

Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/EP05/050985

International filing date: 04 March 2005 (04.03.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: DE
Number: 10 2004 011 356.4
Filing date: 05 March 2004 (05.03.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 08 June 2005 (08.06.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung****Aktenzeichen:**

10 2004 011 356.4

Anmeldetag:

05. März 2004

Anmelder/Inhaber:

Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen/DE

Bezeichnung:Verfahren zur Herstellung von reflektiven optischen
Elementen, reflektive optische Elemente, EUV-
Lithographievorrichtungen und Verfahren zum
Betrieb von optischen Elementen und EUV-
Lithographievorrichtungen**IPC:**

G 02 B, G 03 F

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**München, den 21. März 2005
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Schmidt C.

CZ 0105
5. März 2004
ME/ HUE/ NAS/WOS
20040063

CARL ZEISS SMT AG
Carl-Zeiss-Straße 22
73447 Oberkochen
Deutschland

**Verfahren zur Herstellung von reflektiven optischen Elementen,
reflektive optische Elemente, EUV-Lithographievorrichtungen und
Verfahren zum Betrieb von optischen Elementen und
EUV-Lithographievorrichtungen**

**Verfahren zur Herstellung von reflektiven optischen Elementen,
reflektive optische Elemente, EUV-Lithographievorrichtungen und
Verfahren zum Betrieb von optischen Elementen und
EUV-Lithographievorrichtungen**

Technisches Feld der Erfindung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von Viellagensystemen mit Deckschichtsystem, insbesondere reflektive optische Elemente für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich, ein entsprechendes reflektives optisches Element für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich, sowie ein EUV-Lithographiegerät mit mindestens einem solchen reflektiven optischen Element.

Außerdem betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Herstellung eines reflektiven optischen Elementes für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenbereiches mit einem Deckschichtsystem konstanter Dicke, ein reflektives optisches Element für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenbereich mit einem Deckschichtsystem konstanter Dicke sowie ein EUV-Lithographiegerät mit mindestens einem solchen reflektiven optischen Element.

Die Erfindung betrifft auch ein reflektives optisches Element aus einem Viellagensystem mit Deckschichtsystem, das mindestens eine Schicht aus einem Übergangsmetall aufweist, wobei das Viellagensystem für eine Betriebswellenlänge im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich optimiert ist, ein Lithographiegerät mit mindestens einem solchen reflektiven optischen Element sowie Verfahren zum Betrieb von reflektiven optischen Elementen.

Ferner betrifft die Erfindung eine EUV-Lithographievorrichtung und ein Verfahren zum Betrieb einer solchen EUV-Lithographie-Vorrichtung.

Hintergrund der Erfindung

Optische reflektive Elemente für den weichen Röntgen- bis EUV-Wellenlängenbereich (z. B. Wellenlängen zwischen 5 nm und 20 nm), wie zum Beispiel Photomasken oder Viellagenspiegel, werden insbesondere zum Einsatz in der EUV-Lithographie von Halbleiterbauelementen benötigt. Typische EUV-Lithographiegeräte weisen acht oder mehr reflektive optische Elemente auf. Um dennoch eine hinreichende Gesamtintensität der Betriebsstrahlung zu erreichen, müssen die Spiegel möglichst hohe Reflektivitäten aufweisen, denn die Gesamtintensität ist proportional zum Produkt der Reflektivitäten der einzelnen Spiegel. Diese hohe Reflektivität sollten die reflektiven optischen Elemente möglichst während ihrer gesamten Lebensdauer beibehalten. Weiterhin muss die Homogenität der Reflektivität über die Oberfläche der reflektiven optischen Elemente über die gesamte Lebensdauer erhalten bleiben. Die Reflektivität und die Lebensdauer von diesen reflektiven optischen Elementen werden besonders durch die Kontamination der Oberfläche unter Bestrahlung bei Betriebswellenlänge in Form der Ablagerung von Kohlenstoff und durch Oxidation der Oberfläche beeinträchtigt.

Die reflektiven optischen Elemente kontaminieren während des Betriebs durch Restgase aus der Vakuumatmosphäre. Dabei werden Moleküle des Restgases an den Oberflächen der reflektiven optischen Elemente zunächst adsorbiert und anschließend durch die hochenergetische Photonenstrahlung mittels Emission von Sekundärelektronen und teilweise auch Photoelektronen aufgebrochen. Beim Vorhandensein von Kohlenwasserstoffen in der Restgasatmosphäre entsteht so eine Kohlenstoffschicht, die die

Reflektivität eines reflektiven optischen Elementes um ca. 1 % pro nm Dicke herabsetzt. Bei einem Kohlenwasserstoffpartialdruck von ca. 10^{-9} mbar wird eine Schicht von 1 nm Dicke bereits nach ca. 20 Stunden erreicht. Da zum Beispiel EUV-Lithographiegeräte bei einem Reflektivitätsverlust von 1 % pro reflektivem optischen Element nicht mehr den nötigen Durchsatz erlauben, muss diese Kontaminationsschicht durch einen Reinigungsprozess entfernt werden, der bis zu 5 Stunden dauern kann. Außerdem birgt ein derartiger Reinigungsprozess die Gefahr, dass die Oberfläche des reflektiven optischen Elementes beschädigt wird, zum Beispiel aufgeraut oder oxidiert wird und daher die Ausgangsreflektivität nicht wieder erreicht werden kann.

Sauerstoffhaltige Restgasmoleküle können zur Oxidation der Oberflächen beitragen. Dabei könnte die ungeschützte Oberfläche eines reflektiven optischen Elementes bereits innerhalb weniger Stunden zerstört werden.

Herkömmliche Viellagensysteme werden hergestellt, indem Materialien mit unterschiedlichen Brechungsindizes und/oder unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten übereinander in mehreren Lagen auf einem Substrat abgeschieden werden. Sie werden insbesondere im extrem ultravioletten Wellenlängenbereich als Spiegel eingesetzt. Andere Anwendungsmöglichkeiten von Viellagensystemen sind beispielsweise im sichtbaren Wellenlängenbereich Antireflexbeschichtungen von optischen Elementen.

Die Reflexion elektromagnetischer Strahlung an einem Viellagensystem basiert auf Interferenzen zwischen der Strahlung, die an den vielen Grenzschichten des Viellagensystems reflektiert wird, und wird durch das Bragg'sche Gesetz beschrieben. Diese Reflexion ist also dispersiver Natur. Die Reflektivität der Grenzschicht zwischen zwei

solcher Lagen für elektromagnetische Strahlung in einem Wellenlängenbereich < 50 nm beträgt einige Promille für Winkel, die größer als der kritische Winkel sind. Für solche Winkel können mit Viellagensystem Reflektivitäten bis zur Größenordnung von 70 % erhalten werden. Viellagensysteme werden daher verwendet, um hohe Reflektivitäten bei großen Winkeln relativ zur Lagenoberfläche zu erreichen, und können auch als dispersive Elemente verwendet werden.

Ein Viellagensystem für die Reflexion kurzer Wellenlängen besteht aus sukzessiven Perioden von jeweils zwei oder mehr Lagen von Materialien mit unterschiedlichen Brechungsindizes und Dicken, beispielsweise in der Größenordnung der Wellenlänge der reflektierten Strahlung. Die totale Reflektivität eines Viellagensystems wird bestimmt durch die Größenordnung der Reflexion pro Grenzfläche, d.h. der Differenz der Brechungsindizes und andererseits der Absorptionskoeffizienten.

Die Dicken der einzelnen Lagen sind üblicherweise für jedes Material über die Viellagendicke konstant. Je nach Anforderung an den Spiegel in Bezug auf das Reflexionsprofil sind aber auch alle möglichen anderen Viellagensysteme denkbar.

Im EUV-Bereich wird überwiegend von Molybdän/Silizium oder Molybdän/Berylliumsystemen ausgegangen.

Zum Schutz gegen äußere Einflüsse, wie z. B. Kontamination, kann auf der Oberfläche des reflektiven optischen Elementes ein Deckschichtsystem vorgesehen sein. Durch die Wahl ausgesuchter Deckschichtmaterialien kann die Kontamination bzw. Degradation der Oberfläche der reflektiven optischen Elemente positiv beeinflusst werden. Durch Variation der Dicke der einen oder mehr Deckschichten

kann erreicht werden, dass trotz Deckschichtsystem die Reflektivität des reflektiven optischen Elementes nicht zu sehr abnimmt.

Optische Elemente aus einem Substrat und einem Viellagensystem, das für hohe Reflektivitäten bei einer bestimmten Wellenlänge optimiert ist, z.B. Photomasken oder Spiegel für den extremen ultravioletten Wellenlängenbereich (EUV) werden insbesondere zum Einsatz in der EUV-Lithographie von Halbleiterbauelementen benötigt.

Es ist bereits auch vorgeschlagen worden, nicht allein über die Materialauswahl, sondern über die Geometrie des Deckschichtsystems die allgemeine Degradation und speziell die Kontamination durch kohlenstoffhaltige Stoffe möglichst gering zu halten bzw. ihren Einfluss handhabbar zu machen. Durch gezielte Wahl der Dickenverteilung des Deckschichtsystems kann gesteuert werden, an welchen Stellen der Oberfläche es zu wie viel Kontamination kommt. Dadurch wird die Kontamination berechenbar und lässt sich beim Betrieb oder der Konzeption von reflektiven optischen Elementen, optischen Systemen und EUV-Lithographievorrichtungen berücksichtigen.

In der Vergangenheit wurde vorgeschlagen, die Struktur der Lagen eines Viellagensystems und insbesondere die Rauigkeit an den Lagengrenzflächen zu bestimmen, indem sowohl die Reflektivität als auch der Photoelektronenstrom gleichzeitig an einer Probe gemessen wird. Dazu wird Strahlung im Röntgenbereich verwendet. Dieser Vorschlag basiert auf der Annahme, dass das Spektrum des Stroms normiert auf die Strahlungsdosis proportional dem Spektrum der stehenden Röntgenwelle ist, die sich im Resonanzfall ausbildet, und die Gestalt des Spektrums von Lagenstruktur und Grenzflächenrauigkeit abhängt. In einer entsprechenden Messvorrichtung wird mit Hilfe eines Monochromators monochromatisiertes Licht im Bereich um 100 eV zur Verfügung gestellt. Dieses wird auf eine Probe gelenkt, die einen

Rotationsfreiheitsgrad zur Änderung des Einfallswinkels hat. Zur Messung der Reflektivität werden typischerweise Photodioden verwendet. Zur Messung der Strahlungsdosis wird ein Netz verwendet, das sich im Strahlengang zwischen Monochromator und Probe befindet. Zur Messung des in der Probe fließenden Stroms ist das Viellagensystem über ein Kabel mit einem Amperemeter verbunden.

Bereits früher war schon grundsätzlich die gleichzeitige Messung von Reflektivität und Photoelektronenstrom zur Charakterisierung von Viellagensystemen vorgeschlagen worden. Dies geschah unter der Annahme, dass die Phasenverschiebung zwischen Reflektivität und Photoelektronenstrom allgemein $\pi/2$ beträgt.

Um hochgradig uniforme dünne Schichten auf ebenen oder gewölbten Substraten abzuscheiden, kann man so vorgehen, dass man zunächst mit Hilfe eines Testsubstrates den Teilchenfluss der Beschichtungsquelle ermittelt. Daraus kann man Schichtdickenprofile errechnen, wobei man auch unterschiedliche Relativbewegungen zwischen Substrat und Quelle berücksichtigt. Davon ausgehend lässt sich bestimmen, wie die gewünschte Dickenverteilung erhalten werden kann. Zur Optimierung der Beschichtungsparameter werden tatsächlich erhaltene Schichtdicken vermessen, indem die Beschichtung stellenweise abgetragen oder weggeätzt wird und der Höhenunterschied zur stehengebliebenen Beschichtung mit Hilfe von Profilometern vermessen wird. Mit handelsüblichen Profilometern können vertikale Auflösungen bis minimal 3 nm erreicht werden.

Bereits bekannt ist die iterative Optimierung von Design und Herstellungsprozess von Viellagensysteme für reflektive optische Elemente aus zwei alternierend aufgetragenen Materialien. Zunächst werden je eine erste Schicht der beiden Materialien aufgebracht. Deren Dickenverteilung wird ermittelt und daraufhin die

Beschichtungsparameter für die gewünschten Lagendicken der übrigen Lagen festgelegt. Die Charakterisierung der Lagendicken, der Periodenlänge und der Rauigkeit an den Grenzflächen wird mit Hilfe von Reflektivitätsmessung und deren Vergleich mit modellierten Daten ermittelt.

In Weiterentwicklung von Kondensatorsystemen für EUV-Lithographiesysteme aus Kollektoreinheit und Gitter, wobei das Gitter mit einem Viellagensystem beschichtet sein kann, ist eine Kollektoreinheit für Wellenlängen von kleiner 193 nm bis in den EUV-Wellenlängenbereich hinein bekannt, deren Hauptbestandteil eine Spiegelschale zur Erzeugung eines uniformen und telezentrischen Abbildes der Strahlungsquelle ist, die auf ihrer Oberfläche eine Gitterstruktur aufweist. Diese Gitterstruktur beugt unterschiedliche Wellenlängen in verschiedene Richtungen. Mit Hilfe einer Spaltblende kann die gewünschte Beugungsordnung bzw. Wellenlänge selektiert werden. Im Übrigen schützt die Spaltblende vor Partikeln, die gegebenenfalls von der Strahlungsquelle herrühren können.

Bereits bekannt sind Regelkreise zur Vermeidung von Kontaminationen auf Oberflächen reflektiver optischer Elemente auf der Basis von Viellagensystemen während ihrer Bestrahlung bei Betriebswellenlängen im EUV-Bereich in einem evakuierten, eine Restgasatmosphäre aufweisenden geschlossenen System. Dabei wird der durch Photoelektronenemission aus der bestrahlten Oberfläche des Viellagensystems erzeugte Photoelektronenstrom gemessen. Die Regulierung der Gaszusammensetzung während der Bestrahlung wird in Abhängigkeit vom gemessenen Photoelektronenstrom durchgeführt, indem bei Erreichen oder Überschreiten eines Schwellenwertes dem geschlossenen System mindestens ein Gas zugeführt und anschließend vor oder bei Erreichen eines anderen Schwellenwertes die Zufuhr dieses Gases zumindest gedrosselt wird.

Zur Verminderung der Kontamination von optischen Elementen, die ein Viellagensystem aufweisen, wurde bisher angenommen, dass das Lagenmaterial und/oder die Lagendicke mindestens einer Lage des Viellagensystems derart gewählt werden sollte, dass die sich bei Reflektion der eingestrahlten Betriebswellenlänge ausbildende stehende elektromagnetische Welle im Bereich der freien Grenzfläche des Viellagensystems einen Knoten der elektrischen Feldstärke aufweist. Dadurch wird die Emission von Photoelektronen aus der Oberfläche minimiert, die sonst Reaktionen z.B. mit dem Restgas auslösen würden, was zu einer verstärkten Kontamination führen könnte.

In der Vergangenheit wurde darauf hingewiesen, dass sich die Kontamination auf Oberflächen von reflektiven optischen Elementen für den weichen Röntgen- und den extrem ultravioletten Wellenlängenbereich besonders effizient vermeiden lässt, wenn einerseits die reflektiven optischen Elemente mit einer Deckschicht versehen sind, die ein oder mehrere Übergangsmetalle aufweist, und andererseits die Bestrahlung bei Betriebswellenlänge in einem evakuierbaren, eine Restgasatmosphäre aufweisenden geschlossenen System stattfindet, wobei in der Restgasatmosphäre gleichzeitig ein reduzierendes Gas oder Gasgemisch und ein oxidierendes Gas oder Gasgemisch vorhanden sein sollten. Die Partialdrücke lassen sich so einstellen, dass sich oxidierende und reduzierende Prozesse an der Oberfläche des reflektiven optischen Elementes die Waage halten, was dazu führt, dass keine nennenswerte Kontamination erfolgt. Besonders bevorzugt ist eine Restgasatmosphäre aus Kohlenwasserstoff, Wasser und Sauerstoff.

Bereits bekannt sind Lithographiegeräte für den Röntgenbereich, die diverse Detektoren aufweisen, um die Strahlungsintensität während der

Bestrahlung der Maske und des Wafers zu kontrollieren. Darüber werden Deformationen der Spiegel detektiert, die durch die Wärmelast verursacht werden, und der Kontaminationszustand der Spiegeloberflächen kontrolliert. Insbesondere zur Detektion der Deformationen und des Kontaminationszustandes wird auf den photoelektrischen Effekt zurückgegriffen. Die ermittelten Deformationen werden während des Belichtungsbetriebes ausgeglichen. Wird festgestellt, dass ein Spiegel kontaminiert ist, so erfolgt ein Signal, dass dieser Spiegel ausgewechselt oder gewartet werden muss.

Es wurde schon darüber nachgedacht, auch EUV-Lithographievorrichtungen bzw. deren Teile in situ durch Verwendung der EUV-Strahlung zu reinigen. Zum Beispiel kann man zusätzlich zu den eigentlichen Betriebsretikeln auch Reinigungsretikel vorhalten, die darauf optimiert sind, den Reinigungsstrahl an die zu reinigenden Stellen zu lenken.

Es wurde versucht, Kontaminationen durch Oxidation zu vermeiden, indem Kohlenwasserstoffe, speziell Alkohol, der Restgasatmosphäre beigemischt werden. Dabei wird zwar erwartet, dass sich dadurch eine selbstterminierende Kohlenstoffschicht auf der Oberfläche eines reflektiven optischen Elementes ablagert. Langzeitversuche > 100 Stunden haben aber erwiesen, dass die Kohlenstoffschicht langsam weiter wächst.

Es ist bekannt, dass die Kohlenstoffkontamination durch Zugabe eines Reinigungsgases entfernt werden kann. Vorgeschlagen werden als Reinigungsgas Sauerstoff, Wasserstoff und Wasser. Problematisch ist aber, dass nicht nur die Kohlenstoffkontaminationsschicht entfernt wird, sondern unter Umständen auch eine Oxidation der unter der Kontamination liegenden Oberfläche verursacht werden kann.

Es wurde vorgeschlagen, durch Zugabe von insbesondere Ethanol und Wasser in einem Verhältnis 2:1 in die Restgasatmosphäre ein gleichzeitiges Entfernen von Kohlenstoffablagerungen von der Oberfläche eines Viellagensystems aus Mo/Si ohne Deckschichtsystem, d. h. mit einer Siliziumschicht terminierend, zu erreichen.

Beschrieben wurde eine Schutzschicht, die die Oxidationsanfälligkeit deutlich reduziert. Dies verlängert die Lebensdauer eines reflektiven optischen Elementes. Für den wirtschaftlichen Einsatz der reflektiven optischen Elemente in beispielsweise einem EUV-Lithographiegerät müssen Lebensdauern von mehreren Jahren erreicht werden.

Ein weiterer Ansatz, Reflektivitätsverluste durch Kontamination zu vermeiden, besteht darin, eine photokatalytische Schutzschicht, z. B. ein Oxid eines Übergangsmetalls, vorzusehen, so dass bei Bestrahlung mit EUV-Strahlung freie Sauerstoffradikale entstehen, die mit Kohlenstoffablagerungen zu flüchtigen Verbindungen reagieren. Ggf. wird Sauerstoff, Wasser und/oder Peroxid zugeleitet.

Zusammenfassung der Erfindung

Eine Aufgabe der Erfindung ist es, ein Herstellungsverfahren für Viellagensysteme mit Deckschichtsystem anzugeben. Außerdem ist es Aufgabe der Erfindung, ein damit hergestelltes reflektives optisches Element anzugeben und ein EUV-Lithographiegerät, in dem ein solches verwendet wird.

Ferner ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zur Herstellung eines reflektiven optischen Elementes mit einem Deckschichtsystem konstanter Dicke anzugeben sowie ein

entsprechendes reflektives optisches Element und ein damit arbeitendes EUV-Lithographiegerät.

Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein gegen Kontamination optimiertes reflektiertes optisches Element für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich anzugeben sowie ein darauf basierendes EUV-Lithographiegerät und Verfahren zum Betrieb eines solchen reflektiven optischen Elementes.

Ferner besteht die Aufgabe darin, eine EUV-Lithographievorrichtung mit einer möglichst langen Lebensdauer sowie ein Verfahren zum Betrieb einer solchen EUV-Lithographievorrichtung anzugeben.

Die Erfindung besteht in einem Verfahren zur Herstellung von Viellagensystemen mit Deckschichtsystem, insbesondere reflektive optische Elemente für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich, mit den Schritten:

1. Entwerfen eines Beschichtungsdesigns für das Viellagensystem mit Deckschichtsystem;
2. Beschichten eines Substrates mit dem Viellagensystem mit Deckschichtsystem;
3. orts aufgelöste Vermessung des beschichteten Substrates im Hinblick auf Reflektivität und Photoelektronenstrom an mindestens einem Oberflächenpunkt;
4. Vergleich der Messdaten mit für unterschiedliche Dicken der Schichten des Deckschichtsystems und/oder der Lagen des Viellagensystems modellierten Daten zur

Bestimmung der durch das Beschichten erreichten Dickenverteilung;

5. gegebenenfalls Anpassen der Beschichtungsparameter und Wiederholen der Schritte 2 bis 5, bis die beschichtete Dickenverteilung mit dem Design übereinstimmt;

sowie einem derart hergestellten reflektiven optischen Element für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich und einem EUV-Lithographiegerät mit mindestens einem solchen reflektiven optischen Element.

In einer bestimmten Ausprägung besteht die Erfindung in einem Verfahren zur Herstellung eines reflektiven optischen Elementes für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenbereiches mit einem Deckschichtsystem konstanter Dicke mit den Schritten:

1. Entwerfen eines Beschichtungsdesigns für das Viellagensystem mit Deckschichtsystem;
2. Beschichten eines Substrates mit dem Viellagensystem mit Deckschichtsystem;
3. Vermessung des beschichteten Substrates im Hinblick auf Reflektivität und Photoelektronenstrom an mindestens einem Oberflächenpunkt;
4. Vergleich der Messdaten mit für unterschiedliche Dicken der Schichten des Deckschichtsystems modellierten Daten zur Bestimmung der durch das Beschichten erreichten Dickenverteilung;

5. gegebenenfalls Anpassen der Beschichtungsparameter und Wiederholen der Schritte 2 bis 5, bis die beschichtete Dickenverteilung mit dem Design übereinstimmt;

sowie einem derart hergestellten reflektiven optischen Element für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenbereich mit einem Deckschichtsystem konstanter Dicke und einem EUV-Lithographiegerät mit mindestens einem derartigen reflektiven optischen Element.

Ferner besteht die Erfindung in einem reflektiven optischen Element für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenbereich aus einem Viellagensystem mit Deckschichtsystem mit mindestens einer Schicht aus einem Übergangsmetall oder einer ein Übergangsmetall enthaltenden Legierung, Verbindung oder Mischung, optimiert für eine Betriebswellenlänge im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich, das sich dadurch auszeichnet, dass mindestens eine Lagen- oder Deckschichtdicke derart gewählt ist, dass sich bei Bestrahlung mit der Betriebswellenlänge eine stehende elektromagnetische Welle derart ausbildet, dass sie ein Intensitätsmaximum im Bereich der freien Grenzfläche des reflektiven optischen Elementes aufweist. In weiteren Ausprägungen besteht diese Erfindung in einem EUV-Lithographiegerät mit mindestens einem derartigen reflektiven optischen Element in einem evakuierbaren Gehäuse und mindestens zwei Zuleitungen, die im Bereich des reflektiven optischen Elementes münden und zur Zuleitung von einem oxidierenden Gas oder Gasgemisch und einem reduzierenden Gas oder Gasgemisch dienen, sowie einem Verfahren zum Betrieb eines derartigen reflektiven optischen Elementes in einem geschlossenen System mit Restgasatmosphäre aus einem Kohlenwasserstoff, Wasser und Sauerstoff, in dem zu Beginn der Bestrahlung mit der Betriebswellenlänge der Kohlenwasserstoffpartialdruck derart erhöht wird, dass sich Kohlenstoff auf und/oder in der obersten Schicht

ablagert, so dass das Intensitätsmaximum der sich ausbildenden stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche befindet.

In weiteren Abwandlungen besteht die Erfindung in einem Verfahren zum Betrieb des genannten reflektiven optischen Elementes in einem geschlossenen System mit einer Restgasatmosphäre aufweisend einen reduzierenden Gasanteil und einem oxidierenden Gasanteil, in dem die Partialdrücke der Gasanteile derart eingestellt werden, dass sich oxidierende und reduzierende Reaktionen an der obersten Deckschicht im Gleichgewicht befinden.

Weiterhin besteht die Erfindung in einem Verfahren zum Betrieb eines reflektiven optischen Element für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich aus einem Viellagensystem mit einer obersten Deckschicht aus Kohlenstoff und/oder einem Oxid in einem geschlossenen System mit einer Restgasatmosphäre aufweisend einen reduzierenden Gasanteil und einem oxidierenden Gasanteil, in dem die Partialdrücke der Gasanteile derart eingestellt worden, dass sich oxidierende und reduzierende Reaktionen an der obersten Deckschicht im Gleichgewicht befinden und einem Lithographiegerät mit mindestens einem reflektiven optischen Element für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich aus einem Viellagensystem mit einer obersten Deckschicht aus Kohlenstoff und/oder einem Oxid bei dem mindestens eine Lagen- oder Deckschichtdicke derart gewählt ist, dass sich bei Bestrahlung mit der Betriebswellenlänge eine stehende elektromagnetische Welle derart ausbildet, dass sie ein Intensitätsminimum im Bereich der freien Grenzfläche des optischen Elementes aufweist, mit einem evakuierbaren Gehäuse, in dem das reflektive optische Element angeordnet ist, und mindestens zwei Zuleitungen, die im Bereich des reflektiven optischen Elementes

münden und zur Zuleitung von einem oxidierenden Gas oder Gasgemisch und einem reduzierenden Gas oder Gasgemisch dienen.

Ein letzter Aspekt der Erfindung besteht in einer EUV-Lithographievorrichtung mit mindestens einem Photoelektronendetektor, ggf. mit Mitteln zum Einstellen einer Restgasatmosphäre innerhalb des EUV-Lithographiegerätes und mit mindestens einem durchstimmbaren Monochromator im Strahlengang, so dass die einfallende Wellenlänge verändert werden kann, insbesondere zwischen der Betriebswellenlänge und mindestens einer Nutzwellenlänge gewechselt werden kann, sowie einem Verfahren zum Betrieb einer solchen EUV-Lithographie-Vorrichtung, bei dem zu vorbestimmten Zeiten vom Strahlungsbetrieb in den Detektionsmodus umgeschaltet wird, indem

1. gezielt die zu untersuchende Stelle bestrahlt wird und unter Durchstimmung des Monochromators der Photoelektronenstrom und ggf. die Reflektivität in Abhängigkeit von der Wellenlänge gemessen werden;
2. aus der Bestimmung des spektralen Verlaufs von Photoelektronenstrom im Bereich maximaler Reflektivität bzw. dem Vergleich der gemessenen Photoelektronenstromdaten mit für unterschiedliche Kontaminationszustände modellierten Daten der Kontaminationszustand ermittelt wird.

Vorteilhafte Ausgestaltungen finden sich in den Unteransprüchen.

Kurze Beschreibung der Figuren

Die Erfindung soll anhand der folgenden Figuren näher erläutert werden. Dazu zeigen

- Fig. 1a ein Herstellungsverfahren für reflektive optische Elemente;
- Fig. 1b eine Modifizierung des in Fig. 1a dargestellten Verfahrens;
- Fig. 2a,b,c, d Messungen der Reflektivität und des Photoelektronenstroms bei unterschiedlichen Kohlenstoffdicken bzw. bei Oxidation;
- Fig. 3a-n Berechnete Reflektivitäts- und Photoelektronenstromkurven für unterschiedliche Kohlenstoffdicken sowie der Intensitätsverlauf einer entsprechenden sich im Resonanzfall ausbildenden stehenden elektromagnetischen Welle;
- Fig. 4 eine Prinzipskizze eines reflektiven optischen Elementes;
- Fig. 5 ein Betriebsverfahren für ein reflektives optisches Element;
- Fig. 6a,b Messkurven des Photoelektronenstroms und der Reflektivität für unterschiedliche Betriebszustände;
- Fig. 7 eine EUV-Lithographievorrichtung;
- Fig. 8 ein Betriebsverfahren für die in Fig. 7 dargestellte EUV-Lithographievorrichtung.

Ausführliche Beschreibung der Erfindung

Die bisher bekannten Herstellungsverfahren für Viellagensysteme mit Deckschichtsystem leiden darunter, dass die Dickenbestimmung der einzelnen Lagen bzw. Schichten nur sehr ungenau vorgenommen werden kann. Insbesondere über Reflektivitätsmessungen lassen sich nur mittlere Lagendicken über die Tiefe des gesamten Viellagensystems bestimmen. Allerdings ist diese Information für die Optimierung des Beschichtungsvorganges von Viellagensystemen ohne Deckschichtsystem auf optimale Reflektivität meist ausreichend. Schwerer wiegt das Problem bei der Herstellung von Viellagensystemen mit Deckschichtsystemen. Das Deckschichtsystem unterbricht die Periodizität, so dass über reine Reflektivitätsmessungen keine verlässlichen Aussagen über die Schichtdicken getroffen werden können. Ein möglichst genaues Einhalten des gewünschten Schichtsystems ist aber gerade bei den Deckschichtsystemen im Hinblick auf die Lebensdauereigenschaften, insbesondere der Kontaminationsresistenz bei möglichst hoher Reflektivität sehr wichtig.

Das hier vorgestellte Messprinzip basiert darauf, dass Änderungen in der Dicke des Deckschichtsystems, das aus einer oder mehreren Schichten bestehen kann, sich in großen Schwankungen des Photoelektronenstroms an dieser Beschichtung äußert, während die Änderung in der Reflektivität nur schwach ausfällt.

Es wird angenommen, dass die physikalische Grundlage darin besteht, dass der Photoelektronenstrom im Bereich der Resonanz in erster Näherung proportional zur Intensität der stehenden elektromagnetischen Welle im Bereich der freien Grenzfläche ist, die sich im Resonanzfall an dem Viellagensystem ausbildet. Die Lage des Maximums der Reflektivität wird primär durch das Design des Viellagensystems an sich bestimmt, während die Dicke des Deckschichtsystems bzw. dessen einzelner Schichten bestimmt, wo die

freie Grenzfläche zum Vakuum des Gesamtsystems liegt. Je nachdem, welche Intensität die stehende Welle genau an dieser freien Grenzfläche annimmt, treten mehr oder weniger Photoelektronen aus. Die Intensitäten der stehenden Welle für beliebige Designs lassen sich mit üblichen Simulationsprogrammen berechnen. Durch Vergleich der modellierten Daten mit den gemessenen Daten lassen sich die Dicken der Schichten des Deckschichtsystems bis in den Subangströmbereich genau ermitteln. Im Hinblick auf die Optimierung der Beschichtungsparameter ist dabei die orts aufgelöste Vermessung der gesamten Oberfläche von großer Bedeutung.

Startet man mit Beschichtungsdesigns und Beschichtungsprozessen, die bereits in der Vergangenheit für Viellagensysteme optimiert wurden, reicht es für den Fall, dass man diese bekannten Viellagensysteme mit zusätzlichen Deckschichtsystemen herstellt, wenn man sich auf die Bestimmung der Dickenverteilung des Deckschichtsystems konzentriert.

Je nach Anwendung des Viellagensystems mit Deckschichtsystem bzw. je nach Einsatzbedingungen des Viellagensystems kann es sinnvoll sein, die Dickenverteilung des Deckschichtsystems über die ganze Oberfläche entweder konstant vorzusehen oder auch variabel, z.B. um hohe Wärmelast, hohe lokale Kontaminationsgefahr u. ä. zu kompensieren.

Vorzugsweise wird das Herstellungsverfahren dahingehend ausgedehnt, dass mit dessen Hilfe auch das Beschichtungsdesign optimiert wird, indem man in einem ersten Durchgang erhaltene Viellagensysteme mit Deckschichtsystem in Simulationsrechnungen zu optischen Systemen testet, in denen das erhaltene Viellagensystem eingesetzt wird und die Simulationsergebnisse mit zuvor aufgestellten Spezifikationen, z.B. bezüglich der Lebensdauer oder

Abbildungscharakteristika vergleicht. Interessant können dabei z. B. die Kontaminationsveränderung mit der Strahlenlast oder die Intensitätsverteilung im durch das Viellagensystem bzw. optische System spektral und geometrisch geformten Strahl sein. Je nach Resultat wird entweder das Beschichtungsdesign modifiziert und eine neue Optimierungsschleife des Beschichtungsvorganges gestartet oder es wird festgestellt, dass das Viellagensystem mit Deckschichtsystem die Spezifikationen erfüllt.

Das Verfahren kann ferner optimiert werden, indem man das Viellagensystem im Strahlungsbetrieb testet und die Testergebnisse mit zuvor aufgestellten Spezifikationen vergleicht. Dabei kann das Viellagensystem als einzelnes optisches Element vermessen werden oder auch als Bestandteil eines optischen Systems. Letzteres empfiehlt sich insbesondere, wenn zuvor Simulationsrechnungen zu diesem optischen System erfolgt sind. Erneut wird je nach Resultat entweder das Beschichtungsdesign – ggf. auch die Auslegung des optischen Systems – und eine neue Optimierungsschleife des Beschichtungsvorganges gestartet oder es wird festgestellt, dass das Viellagensystem mit Deckschichtsystem die Spezifikationen erfüllt.

Damit hätte man alle wichtigen Prozessparameter für die Herstellung bestimmt, so dass man z.B. reflektive optische Elemente für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich auch in Serie herstellen kann.

Besonders gute Ergebnisse lassen sich erreichen, wenn man eine möglichst hochbrillante EUV-Quelle, z.B. eine Synchrotronstrahlungsquelle oder auf kleine Strahlfleckgrößen optimierte laser- oder entladungsinduzierte Plasmaquellen verwendet und dafür Sorge trägt, dass die Oberfläche des Gesamtsystems vollständig abgerastert wird. Für den Beschichtungsvorgang selber

kann man auf alle bereits bekannten Beschichtungsmethoden, wie z. B. das Elektronenstrahlverdampfen, das Sputtern, insbesondere das Magnetronsputtern u. a. zurückgreifen.

In einer besonderen Ausführungsform wird nach dem eben dargestellten Prinzip ein reflektives optisches Element für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich mit einem Deckschichtsystem konstanter Dicke über die gesamte Oberfläche hergestellt. Wie bereits erläutert, kann man sich entweder auf die Optimierung der Beschichtungsparameter beschränken oder auch das Beschichtungsdesign - ggf. auch die Auslegung eines das reflektive optische Element aufweisenden optischen Systems - selber optimieren. Ein wichtiges Optimierungsziel ist dabei die Maximierung der Lebensdauer des reflektiven optischen Elementes bei nach wie vor möglichst hoher Reflektivität bei der Betriebswellenlänge.

Vorteilhafterweise geht man zur Herstellung von reflektiven optischen Elementen für den extrem ultravioletten Wellenlängenbereich von einem Viellagensystem aus, das alternierend aus Molybdän- und Siliziumschichten aufgebaut wird. In der Regel ist dieses Viellagensystem periodisch aufgebaut. Je nach Spezifikation für das reflektive optische Element kann es aber auch geboten sein, die Periodizität oder auch die einzelnen Lagendicken über das gesamte Viellagensystem zu variieren. Man ist auch nicht darauf beschränkt, zwei alternierende Materialien zu verwenden. Z.B. werden häufig auch Zwischenschichten eingeplant, die ein Diffundieren der einzelnen Lagen verhindert. Dies führt zu einer über längere Zeit stabil hohen Reflektivität.

Das Deckschichtsystem ist nicht periodisch aufgebaut, sondern darauf optimiert, das darunter liegende Viellagensystem möglichst effizient gegen äußere Einflüsse zu schützen. Hauptproblem ist dabei die

Kontamination, die sich z.B. in Kohlenstoffablagerungen oder auch Oxidation der Oberfläche äußern kann.

Besonders bevorzugt bestehen Deckschichtsysteme aus z.B. einer Lage Silizium, einer Lage Molybdän und einer obersten Lage Silizium. Bei Inbetriebnahme des reflektiven optischen Elementes bzw. bereits wenn es der normalen Umgebungsatmosphäre ausgesetzt wird, wird die oberste Siliziumschicht gemäß der umgebenden Atmosphäre zumindest zum Teil zu inertem Siliziumdioxid umgesetzt und/oder mit Kohlenstoff belegt. Die Schichtdicken des Silizium-Molybdän-Silizium-Deckschichtsystems sind so gewählt, dass nach Aufwachsen einer Siliziumoxidschicht und/oder Kohlenstoffschicht nach wie vor eine möglichst hohe Reflektivität gegeben ist. Weitere bevorzugte Deckschichtsysteme basieren auf Übergangsmetallen. Besonders bevorzugt sind Gold, Platin, Rhodium, Ruthenium, Palladium, Silber, Rhenium, Osmium, und/oder Iridium, insbesondere auf Molybdän-Silizium-Viellagensystemen.

Die Verwendung derartig hergestellter reflektiver optischer Elemente in EUV-Lithographiegeräten führt zu EUV-Lithographiegeräten mit hoher Lebensdauer. Das erfindungsgemäße reflektive optische Element kann an beliebigen Stellen im EUV-Lithographiegerät eingebaut sein, z.B. im Illuminationssystem oder im Projektionssystem. Dies gilt für alle hier beschriebenen reflektive optischen Elemente.

Bisher wird das Deckschichtsystem für Viellagensysteme für reflektive optische Elemente für die EUV-Lithographie in der Regel in Bezug auf maximale Reflektivität optimiert. Dabei unterscheidet man zwischen zwei Haupttypen von Deckschichtsystemdesigns. Bei den so genannten „Capped Coatings“ besteht das Deckschichtsystem z. B. aus einer Molybdänschicht und einer oxidationsresistenten Schicht aus vorzugsweise Gold, Platin, Rhodium, Ruthenium, Palladium, Silber,

Rhenium, Osmium, und/oder Iridium als Abschlussschicht. Bei den so genannten „Uncapped Coatings“ besteht das Deckschichtsystem in der Regel aus einer ca. 2 bis 3 nm dicken Siliziumschicht und einer ca. 1 bis 2 nm dicken Siliziumoxidschicht als Abschlussschicht, wobei diese Siliziumdioxidschicht in der Regel nicht gezielt aufgetragen wird, sondern sich automatisch nach dem Beschichtungsvorgang z. B. durch Entnahme in die Atmosphäre oder Inbetriebnahme durch Oxidation der Siliziumschicht bildet.

Versucht man, die Viellagensysteme mit Deckschichtsystem auch im Hinblick auf geringe Kontamination zu optimieren, wurden bisher zwei Ansätze verfolgt. Insbesondere bei den so genannten „Uncapped Coatings“ wird versucht, die einzelnen Schichtdicken so zu wählen, dass sich das Minimum der Intensität der sich bei Betriebswellenlänge ausbildenden stehenden elektromagnetischen Welle direkt an der freien Grenzfläche befindet. Dabei wird vermutet, dass auf diese Weise nur minimal Photoelektronen auftreten, die sonst eine höhere Reaktionsrate zwischen Strahlung, Restgasatmosphäre, geladenen Teilchen und Oberfläche verursachen würden. Ein weiterer Ansatz zur Verminderung bzw. Vermeidung von Kontamination bei „Capped Coatings“ besteht darin, dass die Verhältnisse von reduzierenden und oxidierenden Gasen, z.B. Kohlenwasserstoffen, Sauerstoff und Wasser in der Restgasatmosphäre sowie das Material an der freien Grenzfläche, vorzugsweise Übergangsmetalle, derart eingestellt werden, dass sich unter Bestrahlungsbedingungen ein Gleichgewichtszustand einstellt, der zu keinen negativen Einflüssen auf die Stabilität und Reflektivität der Beschichtungen führt. Dieser Gleichgewichtszustand wird dadurch erreicht, dass unter Bestrahlungsbedingungen in der genannten Restgasatmosphäre in die oberste Übergangsmetallschicht etwas zusätzlicher Sauerstoff eingelagert und darauf etwas zusätzlicher Kohlenstoff abgelagert wird. Unter einem Reflektionsverlust von maximal 1 % stellt sich so innerhalb weniger Minuten ein

Gleichgewichtszustand ein, der über die gesamte Lebensdauer nur noch innerhalb dieser Grenzen variiert.

Bei letzteren Viellagensystemen, deren Deckschichtsystem ein Übergangsmetall oder mehrere aufweist, hat sich nun herausgestellt, dass der soeben erwähnte Gleichgewichtszustand am stabilsten ist, wenn sich das Intensitätsmaximum der sich ausbildenden stehenden elektromagnetischen Welle im Bereich der freien Grenzfläche befindet.

Vermutlich hängt der dargestellte

Kontaminationsunterdrückungsprozess nicht nur von einer geeigneten Restgaskombination aus reduzierenden und oxidierenden Gasanteilen z. B. Kohlenwasserstoff, Sauerstoff und Wasser auf der einen Seite und einer metallischen, vermutlich katalytisch aktiven Oberfläche des Deckschichtsystems auf der anderen Seite ab, sondern auch von dem Vorhandensein von reaktionsfördernden freien Elektronen. Die Positionierung des Maximums der stehenden Welle in der Nähe der freien Grenzfläche führt nun dazu, dass stets eine maximale Anzahl an reaktionsfördernden Elektronen bereitgestellt wird.

In einer bevorzugten Ausführungsform wird das Deckschichtdesign so gewählt, dass vor Inbetriebnahme die freie Grenzfläche gegenüber dem Intensitätsmaximum etwas zurückgezogen liegt. Bei Inbetriebnahme in einer Restgasatmosphäre mit Kohlenwasserstoff bzw. bei Lagerung des reflektiven optischen Elementes unter atmosphärischen Bedingungen über einen Zeitraum von mehreren Wochen lagert sich Kohlenstoff auf der Oberfläche ab. Durch Einstellen eines Gleichgewichtes zwischen Prozessen der Oxidation und Abtragung der Oberfläche sowie Reduktion und Anlagerung von Kohlenstoff auf der Oberfläche bildet sich ein Gleichgewicht aus, was dazu führt, dass die Kohlenstoffschicht gerade so dick ist, dass das Intensitätsmaximum der stehenden elektromagnetischen Welle genau an der freien Grenzfläche liegt. Durch Nachregulieren der Partialdrücke kann das Einstellen dieses

Gleichgewichtes beschleunigt werden. Kontrolliert wird der Kontaminationszustand durch in situ-Messungen des Photoelektronenstromes und ggf. der Reflektivität an diesem reflektiven optischen Element. Statt die Reflektivität gleichzeitig zu messen, kann auch auf in Kenntnis des Designs des Viellagensystems berechnete Reflektivitätskurven zurückgegriffen werden. Dadurch, dass auf jeden Fall eine Kohlenstoffschicht vorliegt, wird auch das Risiko einer Degradation der Oberfläche durch ungewollte Oxidationsreaktionen vermindert.

Ein weiterer Vorteil der anfänglichen Kohlenstoffablagerung liegt darin, dass der Kohlenstoff nicht nur auf der obersten Schicht, sondern auch in dem Oberflächenbereich der Matrix der obersten Schicht angelagert wird. Dies verhindert einerseits weitere das Eindringen von Sauerstoff und damit die weitere Oxidation der Oberfläche. Gleichzeitig ist dieser angelagerte Kohlenstoff aber selber aufgrund der festen Anbindung in die Matrix gegen Entfernung, z.B. durch Oxidation weitgehend geschützt. Kohlenstoff, der dennoch entfernt wird, wird durch den hohen Anteil an Kohlenwasserstoffen im Restgas kontinuierlich nachgeführt. Aus der Matrix der Oberfläche sozusagen überstehender Kohlenstoff hingegen wird aufgrund des hohen Anteils an Oxidantien, z. B. Wasser und Sauerstoff im Restgas kontinuierlich entfernt.

Insgesamt ergibt sich, dass zwar stets Kontaminationsprozesse in Form von Kohlenstoffablagerungen stattfinden, dies aber kaum zu einer Verschlechterung der Reflektivität führt, da die Anlagerung von Kohlenstoff an die Oberflächenmatrix eines Deckschichtsystems basierend auf Übergangsmetallen in der Art einer Passivierung nur in Subangströmdicke erfolgt. Somit kommt es weder zu einer Erhöhung der Massendichte noch zu einer nennenswerten Verschiebung der freien Grenzfläche. Im Falle der Oxidation kommt es ebenfalls nicht zu einer Verschiebung der freien Grenzfläche, aber zu einer Einlagerung

von Sauerstoff insbesondere in tiefere Bereiche der Oberflächenmatrix, was zu einer erhöhten Massendichte und damit erhöhter Absorption führt. Die zusätzliche Einlagerung von etwas Sauerstoff in die oberste Einlagerung von etwas Sauerstoff in die oberste Übergangsmetallschicht hat den Vorteil, dass dadurch die weitere Einlagerung von Sauerstoff verhindert werden kann.

Auch im Falle von reflektiven optischen Elementen mit obersten Deckschichten aus einem Oxid und/oder Kohlenstoff hat es sich als vorteilhaft herausgestellt, sie in einer Restgasatmosphäre zu betreiben, in der sich reduzierende und oxidierende Reaktionen an der Oberfläche die Waage halten, speziell Ablagerung von Kohlenstoff und Bildung einer Oxidationsschicht z. B. durch Zugabe von Sauerstoff, Wasserstoff und mindestens einem Kohlenwasserstoff, so dass auch über lange Betriebszeiten keine nennenswerten Reflektivitätsverluste auftreten. Vorzugsweise ist allerdings das Schichtdesign dahingehend optimiert, dass die sich im Resonanzfall ausbildende stehende Welle an der freien Grenzfläche ein Intensitätsminimum ausbildet. Dadurch werden möglichst wenige freie Elektronen an der Oberfläche bereitgestellt, was insgesamt eine dämpfende Wirkung auf alle an der Oberfläche ablaufenden Reaktionen hat. Dadurch wird gewährleistet, dass sich keine nennenswerte Kontamination ausbildet.

Die Lebensdauer von EUV-Optiken kann nicht nur durch Optimierung z.B. des Beschichtungsdesigns wie zuvor beschrieben erreicht werden, sondern auch durch Verbesserung der gesamten EUV-Lithographievorrichtungen im Hinblick auf in situ-Kontrolle, Reinigung und auch Reparatur. Erfindungsgemäß wird vorgeschlagen, dass die EUV-Lithographievorrichtung zusätzlich zu den üblichen Elementen wie z. B. optischen Elementen zumindest einen Photoelektronendetektor aufweist. Dabei kann es auch um ein über ein Kabel direkt mit dem reflektiven optischen Element verbundenes Amperemeter handeln. Es

kann zusätzlich ein Photonendetektor zur gleichzeitigen Messung der Reflektivität vorgesehen sein, falls nicht auf in Kenntnis des Viellagensystemdesigns berechnete Reflektivitätskurven zurückgegriffen werden soll. Außerdem sollten Mittel zum Einstellen einer Restgasatmosphäre innerhalb des EUV-Lithographiegerätes vorhanden sein und mindestens ein durchstimmbarer Monochromator. Als durchstimmbarer Monochromator kann z.B. ein rotierbar gehaltenes Gitter eines Kondensorsystemes an einem EUV-Lithographiegerät dienen. Durch Durchstimmen des Monochromators, z. B. durch Rotation des Gitters wird der Einfallswinkel verändert und damit die Wellenlänge der Strahlung im EUV-Lithographiegerät. Nützlich ist es, wenn nicht nur zwischen zwei Einfallswinkeln grob gewechselt werden kann, sondern auch ein Winkelbereich in möglichst kleinen Schritten durchfahren werden kann.

Mit Hilfe dieser Bestandteile kann zu vorbestimmten Zeiten, die im Zuge der Vollautomatisierung der EUV-Lithographievorrichtung auch in einem Steuercomputer eingespeichert sein können, in den so genannten Detektionsmodus umgeschaltet werden. Zur Vermeidung von negativen Wirkungen auf die zu untersuchende Stelle innerhalb der Lithographievorrichtung, z.B. an zu untersuchenden Spiegeln kann die Restgaszusammensetzung zumindest an der zu untersuchenden Stelle geeignet optimiert werden. Falls eine kontaminationsarme Restgasmischung aus z. B. Kohlenwasserstoff, Wasser und Sauerstoff verwendet wird, sollte dabei darauf geachtet werden, dass die Verhältnisse der Bestandteile zueinander so beibehalten werden, dass das kontaminationsarme Gleichgewicht beibehalten wird. Die zu untersuchende Stelle wird gezielt bestrahlt und unter Durchstimmen des Monochromators werden der Photoelektronenstrom und ggf. die Reflektivität in Abhängigkeit von der Wellenlänge an der betreffenden Stelle gemessen. Aus der Bestimmung des spektralen Verlaufs von Photoelektronenstrom und der Reflektivität und/oder dem Vergleich der

gemessenen Photoelektronenstromdaten mit für unterschiedliche Kontaminationszustände modellierten Daten kann dann der Kontaminationszustand ermittelt werden (Detektionsmodus). Durch diese in situ-Untersuchung kann mit geringstem Aufwand der Funktionszustand der EUV-Lithographievorrichtung bestimmt werden.

Das Verfahren lässt sich dahingehend erweitern, dass bei Überschreiten von ersten Regelgrößen, z. B. bestimmten Verläufen der Photoelektronenstromkurve, die auf eine erhöhte Kontamination deuten, die Restgasatmosphäre dahingehend modifiziert wird, dass die Kontamination reduziert wird (Reinigungsmodus). Bei Überschreiten von zweiten Regelgrößen, z. B. ebenfalls bestimmten Verläufen der Photoelektronenstromkurve, die auf Schäden an der Oberfläche hinweisen, wird nicht nur die Restgasatmosphäre in ihrer Zusammensetzung modifiziert, sondern auch der einfallende Strahl in Bezug auf seinen Querschnitt und seine Lage, so dass definiert Material lokal angelagert und/oder abgetragen werden kann (Reparaturmodus). Auch im Detektions- und Reinigungsmodus wird vorzugsweise orts aufgelöst gearbeitet.

Es kann sinnvoll sein, im Detektionsmodus, im Reinigungsmodus und/oder im Reparaturmodus Partialdrücke im Lithographiegerät zumindest an der beleuchteten Stelle zu verändern, um unerwünschte Effekte wie z. B. zu starke Oxidation zu vermeiden.

Es kann ferner sinnvoll sein, im Detektionsmodus, im Reinigungsmodus und/oder im Reparaturmodus von der normalen Betriebswellenlänge mit Hilfe des Monochromators auf eine davon unterschiedliche Nutzwellenlänge umzuschalten. Hintergrund ist dabei, dass unterschiedliche Wellenlängen aufgrund unterschiedlicher Phasenlagen der sich bei Reflektion ausbildenden stehenden Welle unterschiedliche Photoströme verursachen und durch Ausnutzen des gesamten zur

Verfügung stehenden Wellenlängenspektrums innerhalb der EUV-Lithographievorrichtung zu Detektions-, Reparatur- und/oder Reinigungszwecken gezielt eingesetzt werden können.

Als zusätzliche Hilfsmittel können dabei z.B. ein Reinigungsretikel oder geeignete Kollimatoren und/oder Blenden dienen. Im Gegensatz zu dem üblichen Betriebsretikel ist das spezielle Reinigungsretikel darauf optimiert, in der Regel im Projektionssystem an der zu untersuchenden Stelle zur gewünschten Ausleuchtung bezüglich räumlicher und spektraler Eigenschaften zu gelangen. Dazu kann das Retikel auch mit geeigneten Blenden kombiniert werden. Während eines Scans des Reinigungsretikels wird z. B. die gesamte Oberfläche der zu untersuchenden Stelle analog einer Braun'schen Röhre mit einem kleinen Beleuchtungsfleck abgerastert. Am Ort des Beleuchtungsfleckes kann somit räumlich aufgelöst sowohl Detektion als auch Reinigung als auch Reparatur erfolgen.

Auch mit Hilfe geeigneter Kollimatoren und Blenden kann durch geeignete Einstellung die Größe, die Lage und/oder die Wellenlänge bzw. Bandbreite des Beleuchtungsfleckes verändert werden. Ein Kollimator kommt insbesondere für Kontrollmessungen im Beleuchtungssystem zur Strahlformung in Frage. Eine Blende kann sowohl im Beleuchtungs- als auch im Projektionssystem eingesetzt werden. Kollimatoren und Blenden können auch zusammen verwendet werden. Insbesondere in Kombination mit dem mindestens einen durchstimbaren Monochromator, der vorteilhafterweise über einen Mechanismus zur stufenlosen Einstellung verfügt, können Position und die Größe, die Bandbreite und die Wellenlänge der Nutzstrahlung zur Detektion, Reinigung und Reparatur stufenlos eingestellt werden kann. Auch die Intensität der Nutzstrahlung lässt sich dadurch verändern.

Zur Detektion der Photonen für die Reflektivitätsmessung wird vorzugsweise ein handelsüblicher Halbleiterdetektor verwendet. Zur Detektion der Photoelektronen muss die zu untersuchende Stelle über ein Amperemeter elektrisch leitend mit einer Elektronenauffangvorrichtung verbunden sein. Bei der Elektronenauffangvorrichtung kann es sich z.B. um ein Gitter, einen Metallring oder einen Metallzylinder handeln. Es ist auch möglich, dazu die Wandung der EUV-Lithographievorrichtung zu verwenden, insbesondere wenn zur Trennung verschiedener funktionaler Einheiten, wie z.B. das Projektionssystem oder das Illuminationssystem, Zwischenwände eingezogen sind.

Das Vorhandensein von Zwischenwänden kann auch dazu genutzt werden, abhängig von den in der jeweiligen Partition herrschenden Bedingungen angepasste Restgasatmosphären einzustellen. Man kann sogar so weit gehen, jedes einzelne optische Element in ein einzelnes Kompartiment zu schließen. Die einzelnen Spiegelkompartiments trennt man im Strahlengang beispielsweise durch optische Folienfilter. Außerdem ist das Innere des Spiegelkompartiments über Ventile mit der Umgebung verbunden. Dabei kann es sich bei der Umgebung entweder um die Atmosphäre in anderen Spiegelkompartiments handeln, um die Atmosphäre innerhalb der EUV-Lithographievorrichtung oder auch um eine direkte Gaszufuhr von außen. Durch geschickte Anordnung von Ventilen, Gaszuleitungen, Gasableitungen u. ä., kann sogar erreicht werden, dass Druckdifferenzen innerhalb einer Oberfläche eines reflektiven optischen Elementes erreicht werden. Dies ist insbesondere im Reinigungs- und Reparaturmodus von großem Vorteil.

In der Fig. 1a ist beispielhaft das Herstellverfahren für reflektive optische Elemente für ein EUV-Lithographiegerät dargestellt. Man startet damit, ein Beschichtungsdesign zu entwerfen, das theoretisch

Spezifikationen für den Einsatz z. B. als Maske oder als Spiegel in der Illuminationsoptik oder in der Projektionsoptik erfüllt und u. a. über die Fläche ein in der Dickenverteilung variables Deckschicht- und/oder Viellagensystem aufweisen kann. Das Viellagensystem und das Deckschichtsystem können auf bekannte Art, z. B. durch Elektronenstrahlverdampfen oder Magnetronspotten auf einem Substrat aufgebracht werden. Das fertig beschichtete reflektive optische Element wird durch gleichzeitiges Vermessen der Reflektivität und des Photostroms charakterisiert. Dabei kann entweder winkel- oder energiedispersiv gemessen werden oder bei bestimmten Kombinationen von Winkeln und Energien.

Als Strahlungsquelle kann jede beliebige EUV-Quelle verwendet werden, z. B. basierend auf relativistischen Elektronen sowie laser- oder entladungsinduzierte Plasmen. Besonders genaue Messungen lassen sich mit gut kollimierten Strahlen, die zu kleinen, intensiven Beleuchtungsflecken führen, erhalten, wie man sie z. B. mit Synchrotronstrahlung erhält. Mit Hilfe des Beleuchtungsflecks wird die gesamte beschichtete Fläche abgerastert, so dass zweidimensionale Dickenverteilungen gemessen werden und auch geometrische Beschichtungsparameter dadurch präzise bestimmt und damit gezielt verändert werden können.

Die gemessenen Kurven wertet man z. B. dadurch aus, dass man den Verlauf der Photoelektronenstromkurve im Bereich des Reflektivitätsmaximums, d.h. im Bereich von -3 % bis 1 % um die Wellenlänge bzw. dem entsprechenden Winkel betrachtet. Alternativ fittet man die gemessenen Photoelektronenstromkurven an für unterschiedliche Lagen- und/oder Schichtdicken modellierte Daten. Auf diese Weise erhält man die Lagen- und/oder Schichtdicken bis in den Subangströmbereich genau. In den entsprechenden Modellrechnungen ist zu berücksichtigen, dass die material- und schichtabhängige

Austrittstiefe von Elektronen und ähnliche Effekte den Verlauf der Photoelektronenstromkurven beeinflussen können.

Die ermittelten Dicken vergleicht man mit dem gewünschten Beschichtungsdesign. Bei Abweichungen können die zur Verfügung stehenden Beschichtungsparameter wie u. a. z. B. Drücke, Winkel, Flüsse, Beschichtungsmasken, Bewegungsmuster und vieles mehr entsprechend angepasst werden und ein neuer Beschichtungsprozess durchgeführt werden. Das neue reflektive optische Element wird ebenfalls in der eben beschriebenen Weise auf seine Lagen und/oder Schichtdicken überprüft. Stimmen die gemessenen Dicken mit dem Design überein, kann auch das Design selbst optimiert werden, indem man das reflektive optische Element im Strahlungsbetrieb und/oder in der Simulation eines optischen Systems auf Erfüllen oder Nichterfüllen gewisser Spezifikationen testet. Gegebenenfalls wird das Beschichtungsdesign überarbeitet und ein neuer Beschichtungsprozess durchgeführt, der wie erläutert überprüft wird. Sind sowohl Design als auch Beschichtungsprozess optimiert, kann man basierend auf den nun bekannten optimalen Beschichtungsparametern mit der Serienproduktion des gewünschten reflektiven optischen Elementes beginnen.

Nach dem vorbeschriebenen Verfahren können beliebige Dickenverteilungen hergestellt werden. In einer bevorzugten Ausführungsform stellt man ein reflektives optisches Element basierend auf einem bereits erprobten Viellagensystem her, dessen Beschichtungsprozess schon gut beherrscht wird. Das reflektive optische Element umfasst zusätzlich ein Deckschichtsystem mit über die Fläche konstanter Dickenverteilung (siehe Fig. 1b). Bei der Bestimmung der Dicken konzentriert man sich auf die Dicken der Deckschichten. In Variation zum in Fig. 1a dargestellten Verfahren wird hier das Viellagensystem nicht im wirklichen Strahlungsbetrieb getestet,

sondern Simulationsrechnungen eines optischen Systems durchgeführt, in dem das Viellagensystem mit Deckschichtsystem eingesetzt wird. Die Ergebnisse werden mit zuvor aufgestellten Spezifikationen verglichen, um zu entscheiden, ob das Schichtdesign weiter angepasst werden muss oder nicht. In einer Abwandlung dieses in Fig. 1b dargestellten Verfahrens könnten noch weitere Optimierungsschleifen vorgesehen werden, bei denen das Viellagensystem einzeln oder als Bestandteil des besagten optischen Systems im tatsächlichen Strahlungsbetrieb getestet wird.

In Fig. 2a, b, c sind beispielhaft die energiedispersiv gemessenen Photostromkurven und die teilweise entsprechend modellierten Kurven für Kohlenstoffdicken von 2 Å, 2,5 Å, 3 Å, 3,5 Å (Fig. 2a), 3 Å, 6 Å, 12 Å (Fig. 2b), 10 Å, 20 Å, 30 Å (Fig. 2c) bzw. jeweils ganz ohne zusätzliche Kohlenstoffschicht in beliebigen Einheiten dargestellt. Zum Vergleich sind auch die Reflektivitätskurven für die Proben mit der jeweils dicksten Kohlenstoffschicht und für die Probe ohne Kohlenstoffschicht dargestellt. In Fig. 2a, c sind die reinen Messkurven dargestellt. In Fig. 2b sind die entsprechenden simulierten Kurven durch die gemessene Photoelektronenstromkurve gelegt. Alle Photoelektronenstromkurven werden gleich normiert, so dass die maßstabsgerecht sind. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die berechneten und gemessenen Photoelektronenstromkurven sich systematisch um einen konstanten Untergrund unterscheiden. Das liegt darin begründet, dass bei einer Austrittstiefe größer Null selbst bei Feldstärke Null in der Nähe der freien Grenzfläche ein Photostrom größer Null auftritt.

Gut erkennbar ist zum einen, dass die unterschiedlichen Kohlenstoffschichten sich nur minimal auf die Reflektivität auswirken, die Änderungen in der Photoelektronenkurve aber sehr deutlich sind. Zum anderen lässt sich gut erkennen, dass wegen dieser starken Veränderung in der Photoelektronenstromkurve die Dicke durch Fitten

an modellierte Daten sich tatsächlich bis in den Subangströmbereich genau bestimmen lässt.

Im Fall der reinen Oxidation gemäß Fig. 2d wird keine Verschiebung der freien Grenzfläche beobachtet. Gleichzeitig steigt aber der Photostrom aufgrund Strahlungsabsorption verursacht durch den während der Oxidation eingelagerten Sauerstoff signifikant an.

Der Zusammenhang zwischen Phasenlage einer sich im Resonanzfall an dem reflektiven optischen Element ausbildenden stehenden elektromagnetischen Welle bzw. dem spektralen Verlauf von Photoelektronenstromkurve und der Reflektivität wird anhand der Fig. 3a-n illustriert. Es sind zum einen in der oberen Hälfte die berechneten Verläufe von Reflektivitäts- und Photoelektronenstromkurven und zum anderen in der unteren Bildhälfte die Ortsverteilung der Intensität der stehenden Welle wieder exemplarisch für Kohlenstoffschichten der Dicken von 0 Å bis 65 Å und in beliebige Einheiten dargestellt.

Die Lage der maximalen Reflektivität wird ganz überwiegend von dem exemplarisch gewählten Molybdän-Silizium-Viellagensystem bestimmt. Zu einem geringen Teil wird die Lage der maximalen Reflektivität auch von darüberliegenden Schichten, hier beispielsweise Kohlenstoff bestimmt. Das Vorhandensein eines Deckschichtsystems wirkt sich vor allem auf den absoluten Wert der maximalen Reflektivität aus. Als freie Grenzfläche wird die Grenzfläche zum Vakuum, hier speziell die Grenzfläche der Kohlenstoffschicht zum Vakuum bezeichnet.

Vergleicht man nun jeweils die oberen und unteren Bildhälften, stellt man fest, dass sich bei konstanter Lage der Intensität der stehenden Welle relativ zum Viellagensystem die Lage der freien Grenzfläche mit unterschiedlicher Kohlenstoffdicke ändert, so dass die Intensität der stehenden Welle an der freien Grenzfläche für unterschiedliche

Kohlenstoffdicken unterschiedliche Werte annimmt. Niedrige Intensitätswerte bei hohen Kohlenstoffdicken äußern sich in minimalem Photoelektronenstrom im Resonanzfall und hohe Intensitäten bei geringen Kohlenstoffdichten äußern sich in maximalem Photoelektronenstrom im Resonanzfall. Deutlich erkennbar ist, dass hier der Verlauf der Photoelektronenstromkurve im Bereich der maximalen Reflektivität dem Verlauf der Intensität der stehenden Welle im Bereich der freien Grenzfläche entspricht.

Ein reflektives optisches Element, wie z. B. entsprechend Fig. 1b hergestellt, hat im Prinzip einen Aufbau wie in Fig. 4 dargestellt. Auf ein Substrat 20 sind sich periodisch wiederholende Lageneinheiten $j, j+1, n$ aus in diesem Beispiel jeweils vier Lagen 21,22,23,24 aufgebracht. Dabei handelt es sich beispielsweise um alternierende Molybdänlagen 22 und Siliziumlagen 21 mit Zwischenlagen 23,24 als Diffusionssperre. Indem die Grenzflächen der Molybdän- und Siliziumlagen 21,22 durch die Diffusionssperren 23,24 auch über einige Zeiträume klar definiert bleiben, lässt sich der Maximalwert der Reflektivität länger beibehalten.

An die oberste Lageneinheit n schließt sich das Deckschichtsystem 30 an, das im vorliegenden Beispiel eine über die Fläche konstante Dickenverteilung aufweist. Das Deckschichtsystem besteht hier aus drei Schichten 31,32,33, bei denen es sich z. B. um Silizium/Molybdän/Silizium, Molybdän/Silizium/Siliziumoxid oder Silizium/Diffusionssperre/Übergangsmetall (beide ggf. mit einer obersten Deckschicht aus Kohlenstoff) handeln kann.

Handelt es sich insbesondere um reflektive optische Elemente mit Übergangsmetallen wie Gold, Platin, Rhodium, Ruthenium, Palladium, Silber, Rhenium, Osmium, und/oder Iridium, im Deckschichtsystem wie in letztgenanntem Beispiel, werden diese typischerweise zur Kontaminationsvermeidung und Lebensdauererhöhung in einer

Restgasatmosphäre mit oxidierenden und reduzierenden Gasen bzw. Gasgemischen betrieben. Dabei handelt es sich bevorzugt um eine Restgasatmosphäre aus Kohlenwasserstoff, Wasser und Sauerstoff. Beim Kohlenwasserstoff haben sich insbesondere Kohlenwasserstoffe mit mindestens einem Sauerstoffatom bewährt, wie z. B. Ketone und Säuren. Insbesondere hat sich der Einsatz von Methylmethacrylat (MMA) bewährt.

Dieses gilt nicht allein für Deckschichtsysteme enthaltend die chemische Reinform eines Übergangmetalls, sondern auch für Deckschichtsysteme mit einer ein Übergangsmetall enthaltenden Legierung, Verbindung oder Mischung.

Es hat sich allerdings gezeigt, dass eine derartige Restgasatmosphäre sich auch im Betrieb von reflektierenden optischen Elementen mit einer obersten Deckschicht aus einem Oxid oder Kohlenstoff z. B. ein Deckschichtsystem Silizium/Siliziumoxid/Kohlenstoff positiv auswirkt, insbesondere, wenn das reflektive optische Element dahingehend optimiert ist, dass im Resonanzfall an der freien Grenzfläche ein Intensitätsminimum der stehenden Welle vorliegt.

Eine besonders wirksame Kontaminationsunterdrückung erreicht man, wenn man das Deckschichtsystem mit Übergangsmetall derart entwirft, dass die maximale Intensität der sich im Resonanzfall bildenden stehenden elektromagnetischen Welle sich im Bereich der freien Grenzfläche befindet, insbesondere etwas von der freien Grenzfläche zurückgezogen (siehe auch Fig. 6a). Bei der Inbetriebnahme eines solchen reflektiven optischen Elementes sollte die Restgasatmosphäre durch Erhöhen des Kohlenwasserstoffpartialdrucks zunächst so eingestellt werden, dass eine Kohlenstoffschicht aufwächst. Über Messungen der Reflektivität und des Photoelektronenstroms in der zuvor beschriebenen Art lässt sich bestimmen, ob die maximale

Reflektivität und der maximale Photoelektronenstrom übereinander liegen. Wenn nein, so sollten die einzelnen Partialdrücke so lange nachgeregelt werden, bis sich ein Gleichgewicht einstellt, bei dem die maximale Reflektivität und der maximale Photoelektronenstrom übereinander liegen (siehe auch Fig. 6b). Dieses Verfahren ist in Fig. 5 veranschaulicht. Alternativ ist es auch möglich, einen Gleichgewichtspunkt zu wählen, bei dem die beiden Maxima geringfügig gegeneinander verschoben sind.

Geht man von einem reflektiven optischen Element aus, bei dem bei Vorhandensein einer dünnen Kohlenstoffschicht beide Maxima übereinander liegen, so arbeitet man insgesamt in einem „Kohlenstoffregime“: Bei Ausbilden der Kohlenstoffschicht sofort zu Beginn der Bestrahlung werden auch Lücken in der Übergangsmetallschicht mit Kohlenstoff gefüllt, was zusätzlich zur Kohlenstoffschicht ein Oxidieren verhindert. Gegebenenfalls kann die Kohlenstoffschicht, die sich ausbildet, wenn das reflektive optische Element mit der normalen Atmosphäre in Berührung kommt, bereits ausreichen. Überschüssige Kohlenstoffatome werden zu Kohlendioxid oxidiert und Kohlenstofflücken gleichzeitig wieder aufgefüllt. Dafür, dass diese Prozesse kontinuierlich ablaufen, sorgen insbesondere die Photoelektronen, die in maximaler Anzahl an der freien Grenzfläche zur Verfügung gestellt werden, da sich das Maximum der Intensität der stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche befindet.

Um die gerade beschriebenen Verhältnisse auch in einer EUV-Lithographievorrichtung umzusetzen, eignet sich z. B. eine EUV-Lithographievorrichtung, wie sie grob in Fig. 7 skizziert ist. Sie weist im wesentlichen drei Hauptbestandteile auf: den Teil 40 zur Bereitstellung eines Strahles, das Beleuchtungssystem 50 zur Beleuchtung des Retikels 60, und das Projektionssystem 70, das dazu dient, die

Strukturen des Retikels 60 auf dem Wafer 80 abzubilden. Im vorliegenden Beispiel weisen das Illuminationssystem 50 und das Projektionssystem 70 jeweils zwei Spiegel 51,52 bzw. 71,72 auf. In diesem konkreten Beispiel handelt es sich bei allen Spiegeln um reflektive optische Elemente der vorbeschriebenen Art, d h. mit einem Deckschichtsystem, dessen Schichten über die Spiegelfläche eine konstante Dicke aufweisen.

Um die Spiegel 51, 52 und 71, 72 möglichst kontaminationsarm betreiben zu können, weisen sowohl das Illuminationssystem 50 als auch das Projektionssystem 70 Ventile zur Einstellung der Restgasatmosphäre, hier z. B. Ventile 53,73 zur Zufuhr von Kohlenwasserstoff, Ventile 54,74 zur Zufuhr von Wasser, Ventile 55,75 zur Zuführung von Sauerstoff sowie Ventile 56,76 als Auslassventile auf.

Der Teil 40 der EUV-Lithographievorrichtungen weist neben einer EUV-Lichtquelle 41 und einem Kollektor 42 ein zum Monochromatisieren des Lichtes dienendes Gitter 43 auf. Das Besondere an dem Gitter 43 ist, dass es rotierbar gelagert werden kann, so dass der Einfallswinkel verändert werden kann. Dies erlaubt zum einen, zwischen einer Betriebswellenlänge zum Belichten des Wafers 80 und einer Nutzwellenlänge zum Detektieren von Kontamination, Reinigen und/oder Reparieren einzelner optischer Elemente der EUV-Lithographievorrichtung. Zum anderen erlaubt es auch, Winkelscans zu fahren, um Photostrom und Reflektivitätsmessungen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel bzw. der Wellenlänge am reflektiven optischen Element 51 zu messen. Zu diesem Zweck ist das reflektive optische Element 51 über ein Kabel 92 und ein Amperemeter (nicht dargestellt) mit der geerdeten Vakuumkammer 90 des Illuminationssystems 50 verbunden. Dabei wird die Vakuumkammer 90 als Elektronenfänger genutzt. Außerdem ist ein Photonendetektor 91 vorgesehen, der zu

Messzwecken in den Strahlengang hinter dem reflektiven optischen Element geschwenkt werden kann. Auch der Photonendetektor 91 ist über ein Kabel 93 und ein Ampere- und/oder Voltmeter (nicht dargestellt) mit der geerdeten Vakuumkammerwand 90 verbunden. Nicht dargestellt sind die Leitungen, die die Messsignale an einen Computer zur Datennahme und Auswertung weiterführen. Selbstverständlich können auch andere reflektive optische Elemente bzw. mehrere reflektive optische Elemente bezüglich Photoelektronenstrom und Reflektivität in situ vermessen werden, wenn die entsprechenden Detektoren vorgesehen sind.

Vorzugsweise werden Amperemeter verwendet, bei denen auch eine bestimmte Grundspannung einstellbar ist. Ebenso kann man Spannungsmessgeräte verwenden, an denen auch fließende Ströme auslesbar sind.

Das in Fig. 7 gezeigte EUV-Lithographiegerät kann entweder im Betriebsmodus betrieben werden, in dem die Maske 60 beleuchtet wird und deren Struktur auf dem Wafer 80 abgebildet wird. Es lässt sich aber auch in den Detektionsmodus umschalten, in dem ein oder mehr reflektive optische Elemente auf Kontamination überprüft werden. Im vorliegenden Beispiel soll das reflektive optische Element 51 überprüft werden, da dies der höchsten Strahlenbelastung ausgesetzt ist. Dazu wird ggf. zunächst der Gesamtdruck innerhalb des Illuminationssystems 50 minimiert. Die Oberfläche des reflektiven optischen Elementes 51 wird bestrahlt und der Photoelektronenstrom und die Reflektivität in Abhängigkeit von der Wellenlänge gemessen. Durch das Zusammenspiel von Monochromator 43, Kollimator 42 und Blende 44 kann erreicht werden, dass unterschiedliche Stellen auf der Oberfläche des reflektiven optischen Elementes 51 unabhängig voneinander vermessen werden. Aus der Bestimmung der spektralen Verläufe von Photoelektronenstrom und Reflektivität und/oder Vergleich der

gemessenen Photoelektronenstromdaten mit für unterschiedliche Kontaminationszustände modulierte Daten wird der Kontaminationszustand des reflektiven optischen Elementes 51 ermittelt.

Zur Vermessung, insbesondere von reflektiven optischen Elementen 71, 72 aus dem Projektionssystem 70 wird zum Ausleuchten auch auf das Reinigungsretikel, ggf. in Kombination mit einer geeigneten Blende, zurückgegriffen.

Je nachdem, ob beim Kontaminationszustand bestimmte Regelgrößen überschritten werden oder nicht, wird entweder in den Betriebsmodus in den Reinigungsmodus oder den Reparaturmodus geschaltet. Dazu benutzt man zwei Regelgrößen bzw. zwei Sätze von Regelgrößen. Das Überschreiten der ersten Regelgröße bedeutet, dass das reflektive optische Element so stark kontaminiert ist, dass eine Reinigung durchgeführt werden muss. Das Überschreiten der zweiten Regelgröße bedeutet, dass eine Reinigung nicht ausreicht, sondern das reflektive optische Element an der Oberfläche repariert werden muss.

Im Falle, dass in den Reinigungsmodus geschaltet wird, werden in Abhängigkeit der festgestellten Kontamination die Partialdrücke der reduzierenden und oxidierenden Gasanteile z. B. von Kohlenwasserstoff, Wasser und Sauerstoff eingehend modifiziert, so dass bei Bestrahlung mit der Nutzstrahlung die Kontamination an dem reflektiven optischen Element reduziert wird. Wenn die Kontamination hinreichend entfernt ist, wird wieder in den Betriebsmodus geschaltet.

Für den Fall, dass man in den Reparaturmodus schalten muss, wird nicht nur die Restgasatmosphäre angepasst, sondern auch der einfallende Strahl in seinem Querschnitt und seiner Lage dahingehend modifiziert, das Material definiert lokal angelagert und/oder abgetragen

werden kann. Dazu nutzt man wieder die Rotierbarkeit des Gitters 43 sowie den Kollimator 42 und die Spaltblende 44 bzw. bei Reinigung oder Reparatur im Projektionssystem 70 das Reinigungsretikel. Sobald die Reparatur durchgeführt worden ist, kann wieder in den Betriebsmodus geschaltet werden. Dieser Verfahrensablauf ist auch in Fig. 8 dargestellt.

Bei Durchführung der Detektion, Reinigung und/oder Reparatur innerhalb des Projektionssystems kann zusätzlich zu dem rotierbaren Gitter 43, dem Kollimator 42 und insbesondere auf ein nicht dargestelltes Reinigungsretikel zurückgegriffen werden, durch das das normale Retikel 60 im Detektions-, Reinigungs- und/oder Reparaturmodus ersetzt wird. Die Strukturen auf dem Reinigungsretikel sind darauf optimiert, gezielt die optischen Elemente zu Detektions-, Reinigungs- und Reparaturzwecken ggf. mit spektral modifizierter Strahlung auszuleuchten. Dazu kann das Reinigungsretikel auch drehbar und translatierbar gelagert sein.

Das Umschalten zwischen Detektions-/Reinigungs- und Reparaturmodus sowie Betriebsmodus kann insbesondere von folgenden Maßnahmen begleitet werden: Veränderung der Restgaszusammensetzung, Veränderung von ggf. im Bereich der Flugbahnen der emittierten Photoelektronen angelegten elektrischen Felder (z. B. durch einen Ring, ein Gitter oder einen Zylinder oder Setzen des reflektiven optischen Elementes auf ein Potential) zur Lenkung der Elektronen und Abschirmung vor positiven Ionen und/oder Veränderung der Strahlcharakteristik. Die Veränderung der Strahlcharakteristik geschieht u. a. durch Einstellen der Mittenwellenlänge, der Bandbreite, der Divergenz und der Intensität am Monochromator und/oder Reinigungsretikel, durch Einstellen des Strahldurchmessers, Strahlwinkels und der Divergenz am Kollimator, durch Einstellen der Größe des Strahlflecks und der Wellenlänge durch

Abschattung bzw. Auswahl einer Reflexionsordnung mittels einer Blende.

Außer der Vakuumkammerwand 90 kann man als Elektronenauffangvorrichtung auch ein Gitter, einen Drahring oder einen Zylinder verwenden, die jeweils mit dem zu vermessenden reflektiven optischen Element oder der Masse über Amperemeter elektrisch leitend verbunden sind. Insbesondere kann das zu vermessende reflektive optische Element über ein Kabel mit einem Amperemeter elektrisch leitend verbunden sein. Auch hier kann ein Meßgerät verwendet werden, bei dem auch die Spannung einstellbar ist.

Um zwischen dem zu vermessenden reflektiven optischen Element und der Elektronenauffangvorrichtung ein definiertes elektromagnetisches Feld zu erzeugen, wird mit Hilfe einer zusätzlichen Komponente, wie z. B. eines Rings, eines Zylinders oder eines Gitters, ein definiertes elektrisches Potenzial angelegt. Diese Komponente kann dabei beliebig komplex gestaltet sein und ist mit einer Spannungsquelle verbunden. Zur Erzeugung eines definierten elektromagnetischen Feldes kann beispielsweise auch das zu vermessende reflektive optische Element selbst auf eine bestimmte Spannung gelegt werden.

Die Erfindung wurde zwar in Verbindung mit bevorzugten Ausführungsbeispielen besprochen, ist aber nicht darauf beschränkt.

Patentansprüche

1. Herstellung eines Viellagensystems mit Deckschichtsystem, insbesondere für ein reflektives optisches Element für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich, mit den Schritten:
 1. Entwerfen eines Beschichtungsdesigns für das Viellagensystem mit Deckschichtsystem;
 2. Beschichten eines Substrates mit dem Viellagensystem mit Deckschichtsystem;
 3. orts aufgelöste Vermessung des beschichteten Substrates im Hinblick auf Reflektivität und Photoelektronenstrom an mindestens einem Oberflächenpunkt;
 4. Vergleich der Messdaten mit für unterschiedliche Dicken der Schichten des Deckschichtsystems und/oder der Lagen des Viellagensystems modellierten Daten zur Bestimmung der durch das Beschichten erreichten Dickenverteilung;
 5. gegebenenfalls Anpassen der Beschichtungsparameter und Wiederholen der Schritte 2 bis 5, bis die beschichtete Dickenverteilung mit dem Design übereinstimmt.
2. Herstellungsverfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass in Schritt 4 die Dickenverteilung des Deckschichtsystems ermittelt wird.
3. Herstellungsverfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Design entworfen wird, bei dem die

Dickenverteilung des Deckschichtsystems über die gesamte Oberfläche konstant ist.

4. Herstellungsverfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Design entworfen wird, bei dem die Dickenverteilung des Deckschichtsystems über die Oberfläche variabel ist.
5. Herstellungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4 mit den zusätzlichen Schritten:
 6. Simulationsrechnung eines optischen Systems, in dem das Viellagensystem eingesetzt wird, und Vergleich der Simulationsergebnisse mit zuvor aufgestellten Spezifikationen;
 7. gegebenenfalls Anpassen des Schichtdesigns und Wiederholen der Schritte 2 bis 7, bis das Viellagensystem mit Deckschichtsystem die Spezifikationen erfüllt.
6. Herstellungsverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5 mit den zusätzlichen Schritten:
 - 6'. Testen des Viellagensystems mit Deckschichtsystem im Strahlungsbetrieb und Vergleich der Testergebnisse mit zuvor aufgestellten Spezifikationen;
 7. gegebenenfalls Anpassen des Schichtdesigns und Wiederholen der Schritte 2 bis 5, 6 und/oder 6', 7, bis das Viellagensystem mit Deckschichtsystem die Spezifikationen erfüllt.

7. Reflektives optisches Element für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich, hergestellt nach den Ansprüchen 1 bis 6.
8. EUV-Lithographiegerät mit mindestens einem reflektiven optischen Element nach Anspruch 7.
9. Verfahren zur Herstellung eines reflektiven optischen Elementes für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenbereiches mit einem Deckschichtsystem konstanter Dicke mit den Schritten:
 1. Entwerfen eines Beschichtungsdesigns für das Viellagensystem mit Deckschichtsystem;
 2. Beschichten eines Substrates mit dem Viellagensystem mit Deckschichtsystem;
 3. Vermessung des beschichteten Substrates im Hinblick auf Reflektivität und Photoelektronenstrom an mindestens einem Oberflächenpunkt;
 4. Vergleich der Messdaten mit für unterschiedliche Dicken der Schichten des Deckschichtsystems modellierten Daten zur Bestimmung der durch das Beschichten erreichten Dickenverteilung;
 5. gegebenenfalls Anpassen der Beschichtungsparameter und Wiederholen der Schritte 2 bis 5, bis die beschichtete Dickenverteilung mit dem Design übereinstimmt.

10. Herstellungsverfahren nach Anspruch 9 mit den zusätzlichen Schritten:
 6. Simulationsrechnung eines optischen Systems, in dem das Viellagensystem eingesetzt wird, und Vergleich der Simulationsergebnisse mit zuvor aufgestellten Spezifikationen;
 7. gegebenenfalls Anpassen des Schichtdesigns und Wiederholen der Schritte 2 bis 7, bis das Viellagensystem mit Deckschichtsystem die Spezifikationen erfüllt.
11. Herstellungsverfahren nach Anspruch 9 oder 10 mit den zusätzlichen Schritten:
 - 6'. Testen des Viellagensystems mit Deckschichtsystem im Strahlungsbetrieb und Vergleich der Testergebnisse mit zuvor aufgestellten Spezifikationen;
 7. gegebenenfalls Anpassen des Schichtdesigns und Wiederholen der Schritte 2 bis 5, 6 und/oder 6', 7, bis das Viellagensystem mit Deckschichtsystem die Spezifikationen erfüllt.
12. Reflektives optisches Element für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenbereich mit einem Deckschichtsystem konstanter Dicke hergestellt gemäß dem Verfahren nach den Ansprüchen 9 bis 11.
13. EUV-Lithographiegerät mit mindestens einem reflektiven optischen Element gemäß Anspruch 12.

14. Reflektives optisches Element für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenbereich aus einem Viellagensystem mit Deckschichtsystem mit mindestens einer Schicht aus einem Übergangsmetall oder einer ein Übergangsmetall enthaltenden Legierung oder Mischung oder Verbindung und optimiert für eine Betriebswellenlänge im extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens eine Lagen- oder Deckschichtdicke derart gewählt ist, dass sich bei Bestrahlung mit der Betriebswellenlänge eine stehende elektromagnetische Welle derart ausbildet, dass sie ein Intensitätsmaximum im Bereich der freien Grenzfläche des reflektiven optischen Elementes aufweist.
15. Reflektives optisches Element nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass die mindestens eine Lagen- oder Deckschichtdicke derart gewählt ist, dass das Intensitätsmaximum auf der Vakuumseite der freien Grenzfläche des reflektiven optischen Elementes liegt.
16. Lithographiegerät mit mindestens einem reflektiven optischen Element gemäß Anspruch 14 oder 15 und mit in einem evakuierbaren Gehäuse und mindestens zwei Zuleitungen, die im Bereich des reflektiven optischen Elementes münden und zur Zuleitung von einem oxidierenden Gas oder Gasgemisch und einem reduzierenden Gas oder Gasgemisch dienen.
17. Verfahren zum Betrieb eines reflektiven optischen Elementes gemäß Anspruch 14 oder 15 in einem geschlossenen System mit Restgasatmosphäre aus einem Kohlenwasserstoff, Wasser und Sauerstoff, in dem zu Beginn der Bestrahlung mit der Betriebswellenlänge der Kohlenwasserstoffpartialdruck derart erhöht wird, dass sich Kohlenstoff auf und/oder an der obersten

Schicht ablagert, so dass das Intensitätsmaximum der sich ausbildenden stehenden elektromagnetischen Welle an der freien Grenzfläche befindet.

18. Verfahren nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Lage des Intensitätsmaximums relativ zur freien Grenzfläche während des Betriebs durch Messung des Photoelektronenstromes überwacht wird und die Partialdrücke von Kohlenwasserstoff, Wasser und Sauerstoff derart nachgeregelt werden, dass die Lage des Intensitätsmaximums bezüglich der freien Grenzfläche konstant wird.
19. Verfahren nach Anspruch 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Partialdrücke derart nachgeregelt werden, dass das Intensitätsmaximum auf der freien Grenzfläche liegt.
20. Verfahren zum Betrieb eines reflektiven optischen Elementes gemäß Ansprüchen 14 bis 15 in einem geschlossenen System mit einer Restgasatmosphäre aufweisend einen reduzierenden Gasanteil und einem oxidierenden Gasanteil, in dem die Partialdrücke der Gasanteile derart eingestellt werden, dass sich oxidierende und reduzierende Reaktionen an der obersten Deckschicht im Gleichgewicht befinden.
21. Verfahren nach Anspruch 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Sauerstoffatom aufweisendes Gas oder Gasgemisch als oxidierender Gasanteil in der Restgasatmosphäre verwendet wird.
22. Verfahren nach Anspruch 20 oder 21, **dadurch gekennzeichnet**, dass als reduzierender Gasanteil in der

Restgasatmosphäre mindestens ein Kohlenwasserstoff verwendet wird.

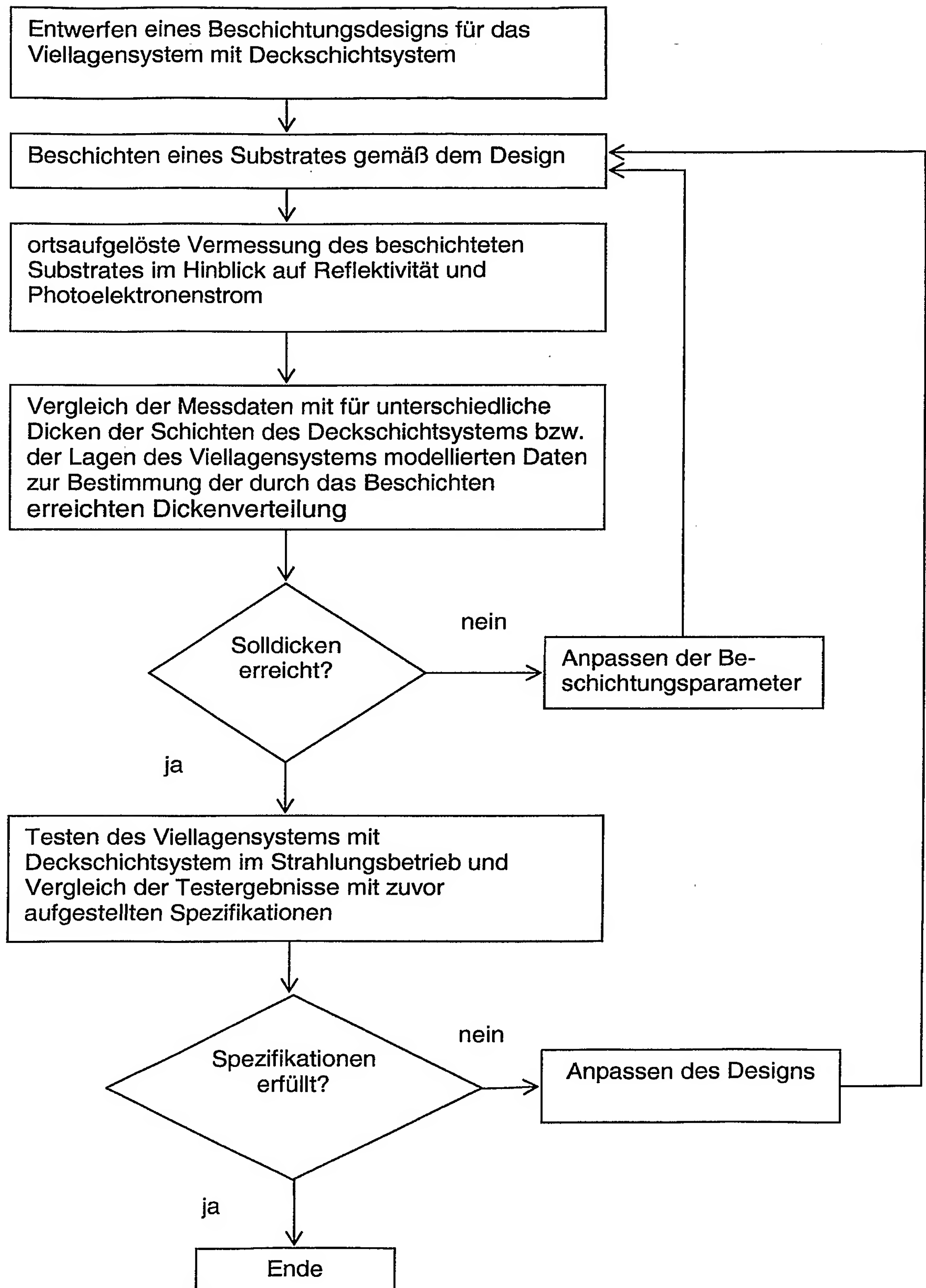
23. Verfahren zum Betrieb eines reflektiven optischen Elementes für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich aus einem Viellagensystem mit einer obersten Deckschicht aus Kohlenstoff und/oder einem Oxid in einem geschlossenen System mit einer Restgasatmosphäre aufweisend einen reduzierenden Gasanteil und einen oxidierenden Gasanteil, in dem die Partialdrücke der Gasanteile derart eingestellt werden, dass sich oxidierende und reduzierende Reaktionen an der obersten Deckschicht im Gleichgewicht befinden.
24. Verfahren nach Anspruch 23, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein reflektives optisches Element verwendet wird, bei dem mindestens eine Lagen- oder Deckschichtdicke derart gewählt ist, dass sich bei Bestrahlung mit der Betriebswellenlänge eine stehende elektromagnetische Welle derart ausbildet, dass sie ein Intensitätsminimum im Bereich der freien Grenzfläche des optischen Elementes aufweist.
25. Verfahren nach Anspruch 24, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Sauerstoffatome aufweisendes Gas oder Gasgemisch als oxidierender Gasanteil in der Restgasatmosphäre verwendet wird.
26. Verfahren nach einem der Ansprüche 23 bis 25, **dadurch gekennzeichnet**, dass als reduzierender Gasanteil in der Restgasatmosphäre mindestens ein Kohlenwasserstoff verwendet wird.

27. EUV-Lithographievorrichtung mit mindestens einem reflektiven optischen Element für den extrem ultravioletten bis weichen Röntgenwellenlängenbereich aus einem Viellagensystem mit einer obersten Deckschicht aus Kohlenstoff und/oder einem Oxid, bei dem mindestens eine Lagen- oder Deckschichtdicke derart gewählt ist, dass sich bei Bestrahlung mit der Betriebswellenlänge eine stehende elektromagnetische Welle derart ausbildet, dass sie ein Intensitätsminimum im Bereich der freien Grenzfläche des optischen Elementes aufweist, mit einem evakuierbaren Gehäuse, in dem das reflektive optische Element angeordnet ist, und mindestens zwei Zuleitungen, die im Bereich des reflektiven optischen Elementes münden und zur Zuleitung von einem oxidierenden Gas oder Gasgemisch und einem reduzierenden Gas oder Gasgemisch dienen.
28. EUV-Lithographievorrichtung mit mindestens einem Photoelektronendetektor mit mindestens einem durchstimbaren Monochromator im Strahlengang, so dass die einfallende Wellenlänge verändert werden kann, insbesondere zwischen der Betriebswellenlänge und mindestens einer Nutzwellenlänge gewechselt werden kann.
29. EUV-Lithographievorrichtung nach Anspruch 29 mit mindestens einem Photoelektronendetektor mit Mitteln zum Einstellen einer Restgasatmosphäre innerhalb des EUV-Lithographiegerätes.
30. EUV-Lithographievorrichtung nach Anspruch 28 oder 29, **dadurch gekennzeichnet**, dass es neben einem Betriebsretikel ein Reinigungsretikel aufweist.

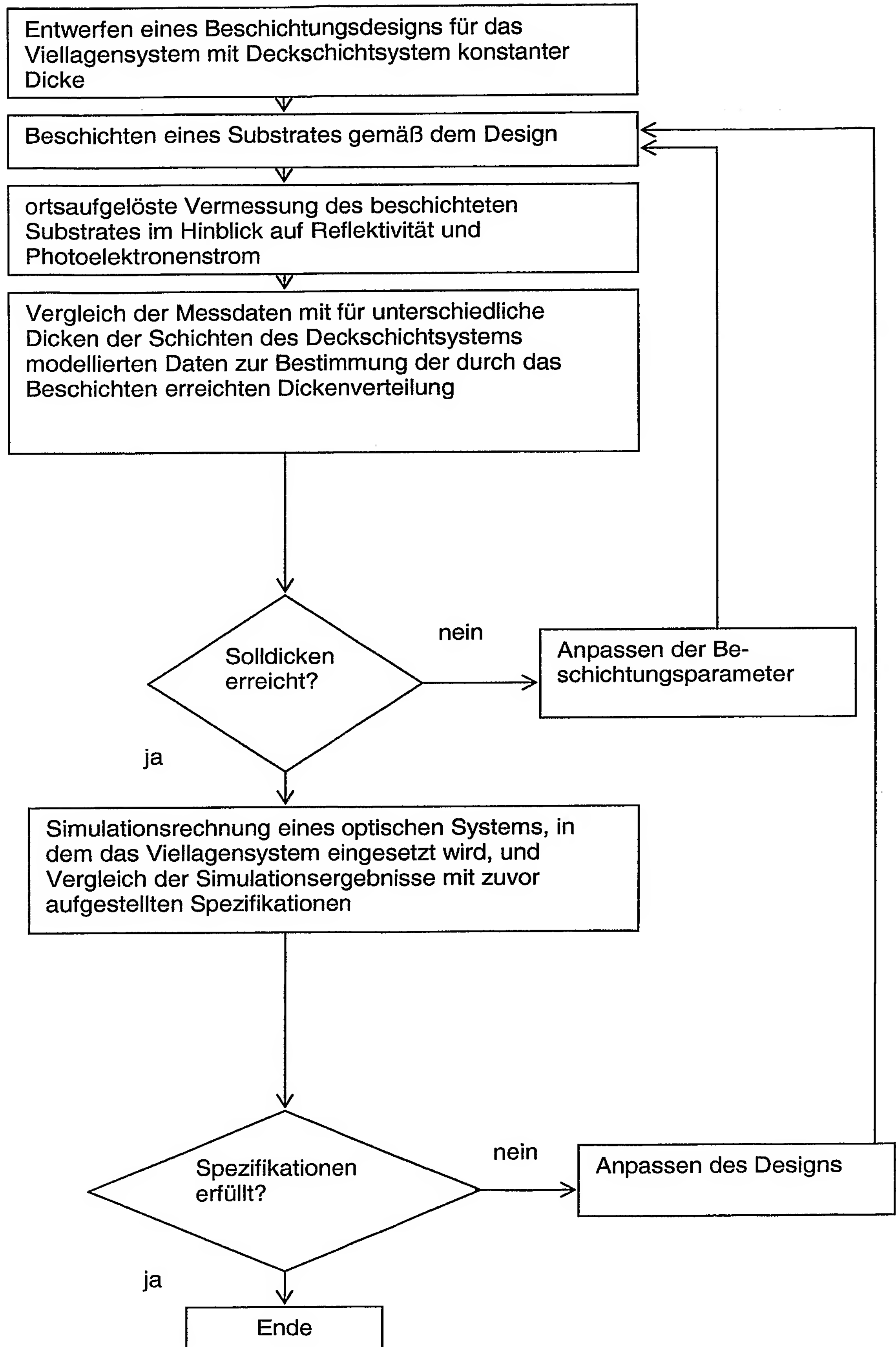
31. EUV-Lithographievorrichtung nach einem der Ansprüche 28 bis 30, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie einen Kollimator und/oder mindestens eine Blende zur geometrischen Strahlformung aufweist.
32. EUV-Lithographievorrichtung nach einem der Ansprüche 28 bis 31, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie Einrichtungen zum Einstellen von lokalen Partialdruckdifferenzen aufweist.
33. Verfahren zum Betrieb einer EUV-Lithographie-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 28 bis 32, bei dem zu vorbestimmten Zeiten vom Strahlungsbetrieb in den Detektionsmodus umgeschaltet wird, indem
 1. gezielt die zu untersuchende Stelle bestrahlt wird und unter Durchstimmung des Monochromators der Photoelektronenstrom und ggf. die Reflektivität in Abhängigkeit von der Wellenlänge gemessen werden;
 2. aus der Bestimmung des spektralen Verlaufs von Photoelektronenstrom im Bereich maximaler Reflektivität bzw. dem Vergleich der gemessenen Photoelektronenstromdaten mit für unterschiedliche Kontaminationszustände modellierten Daten der Kontaminationszustand ermittelt wird.
34. Verfahren nach Anspruch 33, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei Überschreitung von ersten Regelgrößen beim Kontaminationszustand die Restgasatmosphäre dahingehend modifiziert wird, dass die Kontamination reduziert wird.

35. Verfahren nach Anspruch 33, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei Überschreiten von zweiten Regelgrößen beim Kontaminationszustand die Restgasatmosphäre in ihrer Zusammensetzung und der einfallende Strahl in seinem Querschnitt und seiner Lage dahingehend modifiziert werden, dass Material definiert lokal angelagert und/oder abgetragen wird.
36. Verfahren nach einem der Ansprüche 33 bis 35, **dadurch gekennzeichnet**, dass die spektralen und/oder räumlichen Eigenschaften des Beleuchtungsflecks mit Hilfe eines Reinigungsretikels verändert wird.
37. Verfahren nach einem der Ansprüche 33 bis 36, **dadurch gekennzeichnet**, dass die räumlichen und/oder spektralen Eigenschaften des Beleuchtungsflecks mit Hilfe eines Kollimators und/oder mindestens eine Blende verändert werden.
38. Verfahren nach einem der Ansprüche 33 bis 37, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Partialdrücke zumindest an der beleuchteten Stelle während des Messens und/oder des Anlagerns und/oder Abtragens innerhalb des Lithographiegerätes verändert werden.

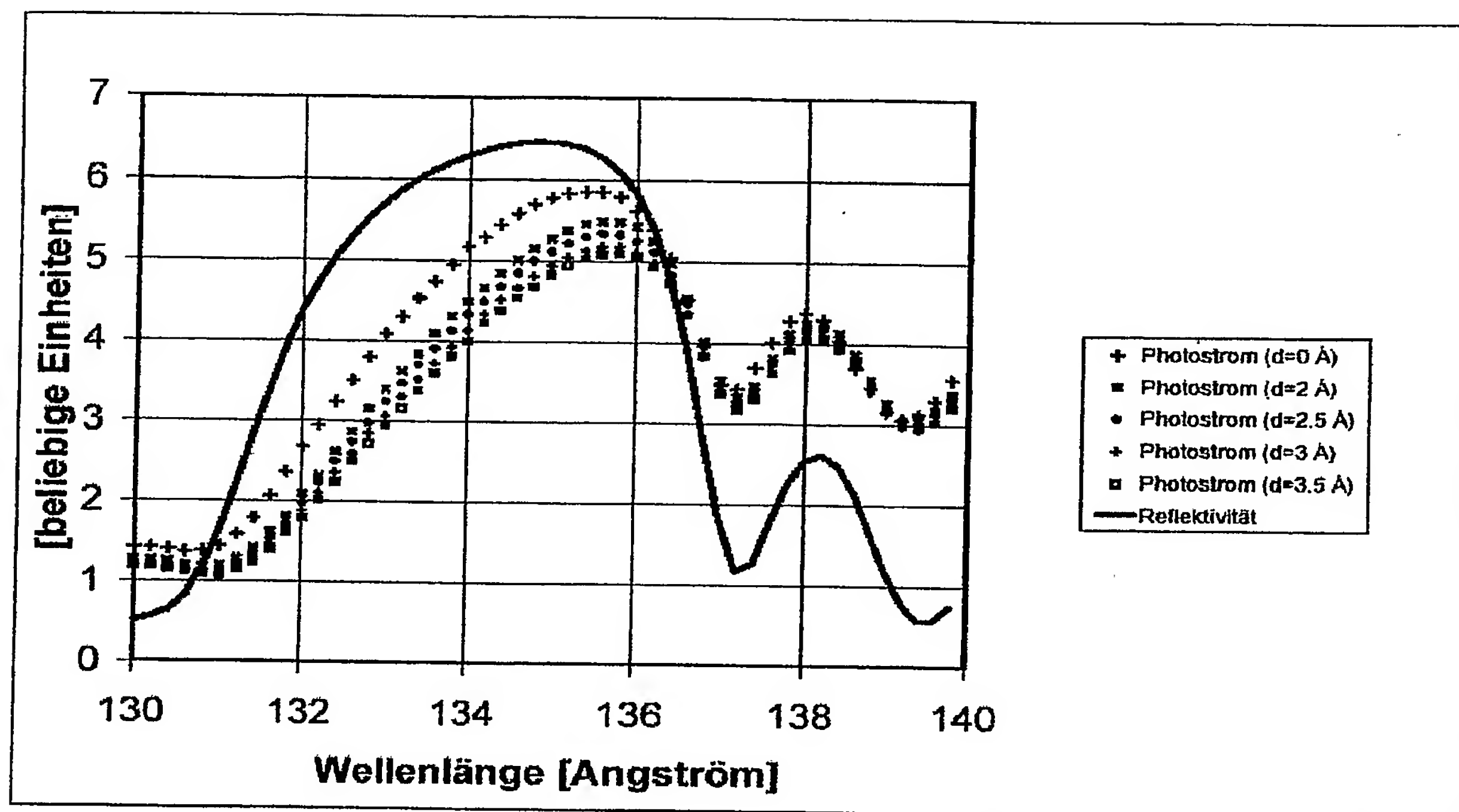
Figur 1a



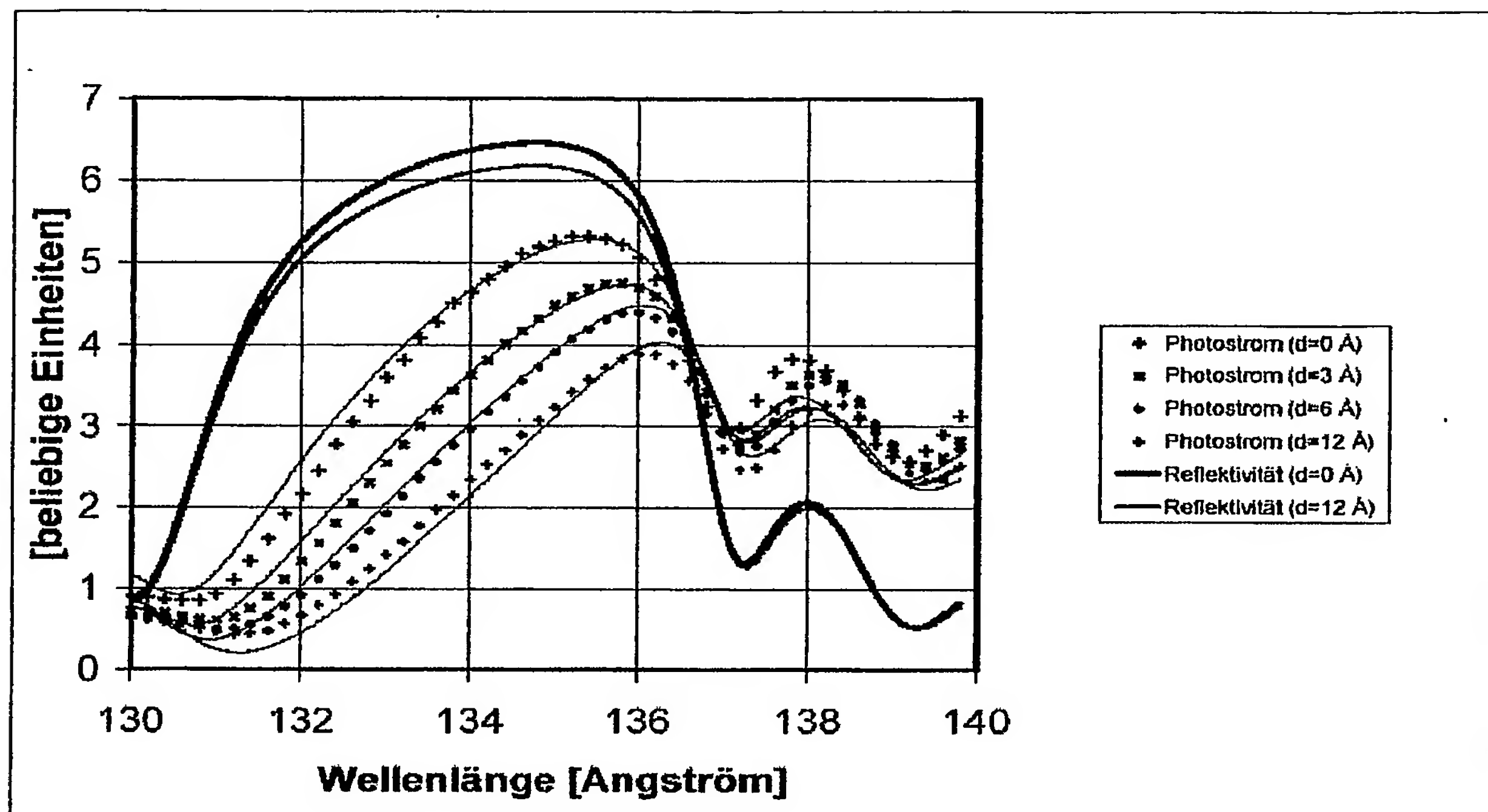
Figur 1b



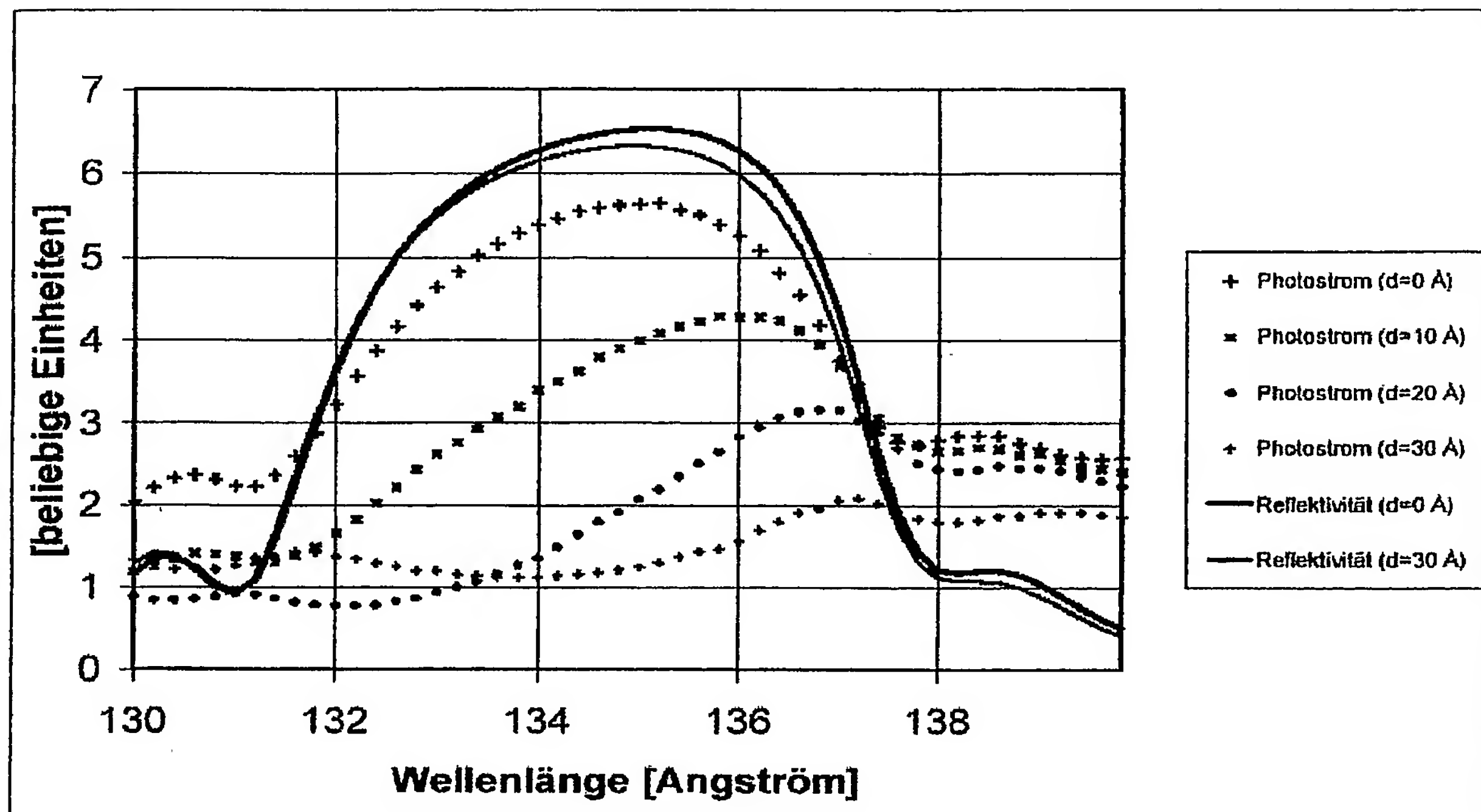
Figur 2a



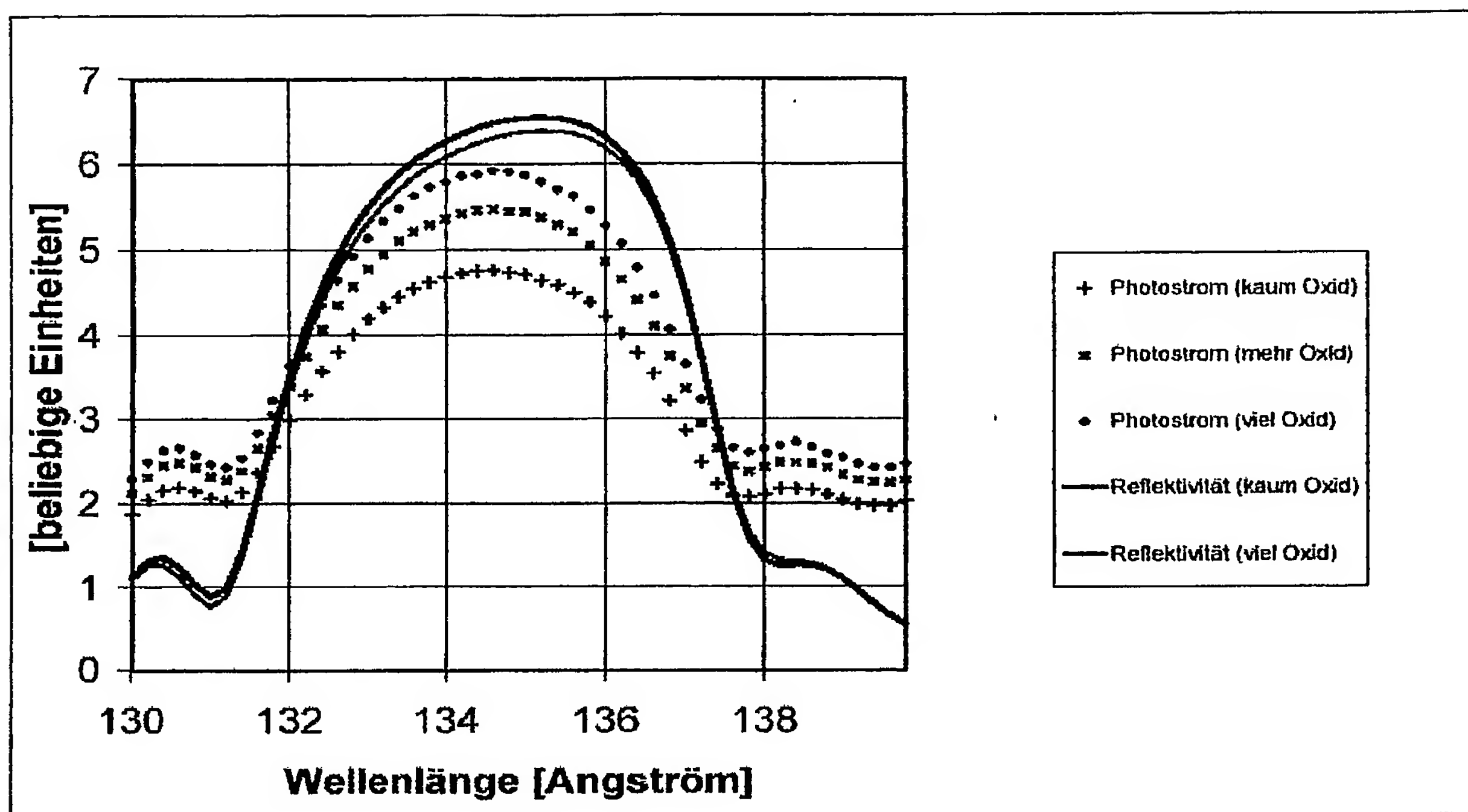
Figur 2b



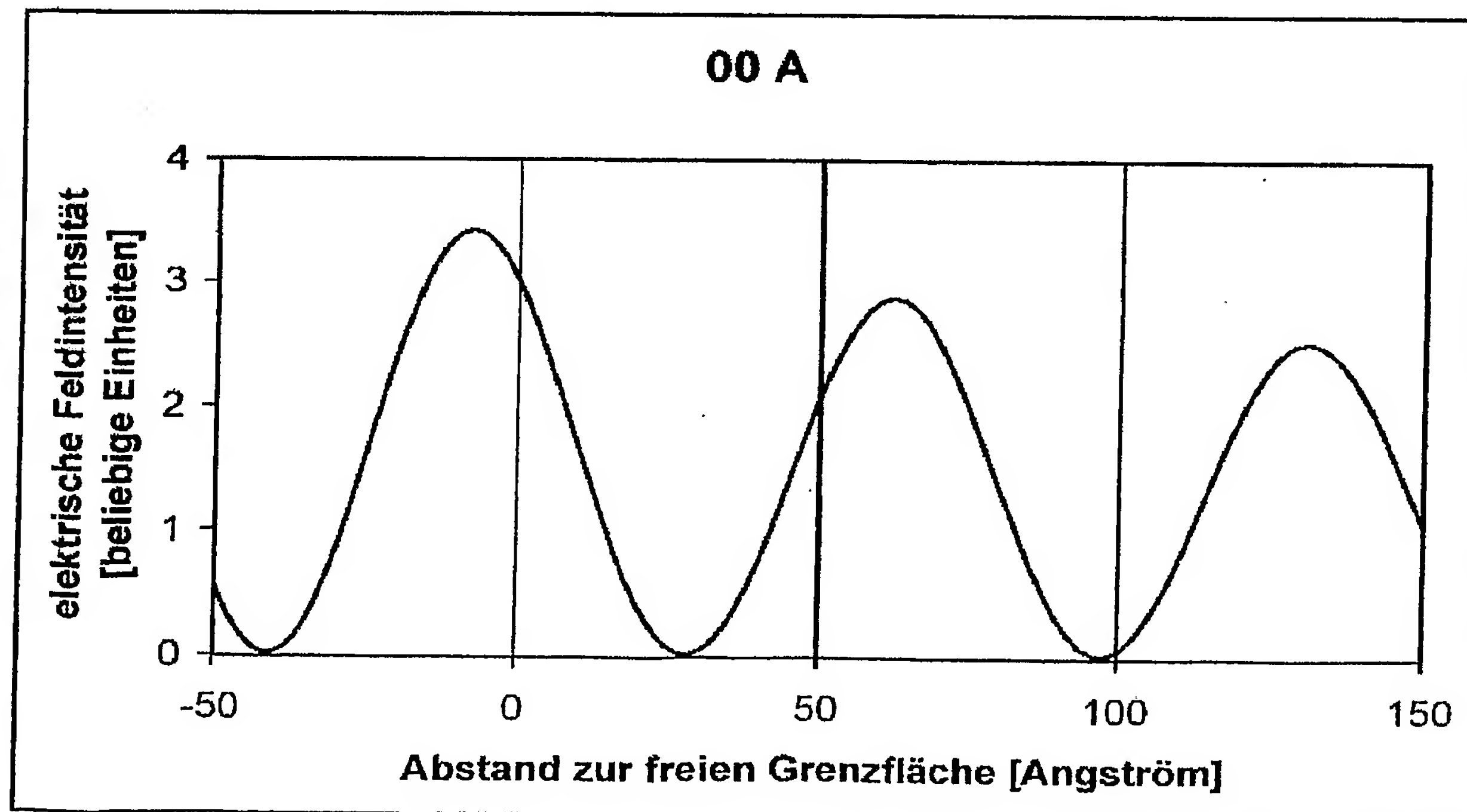
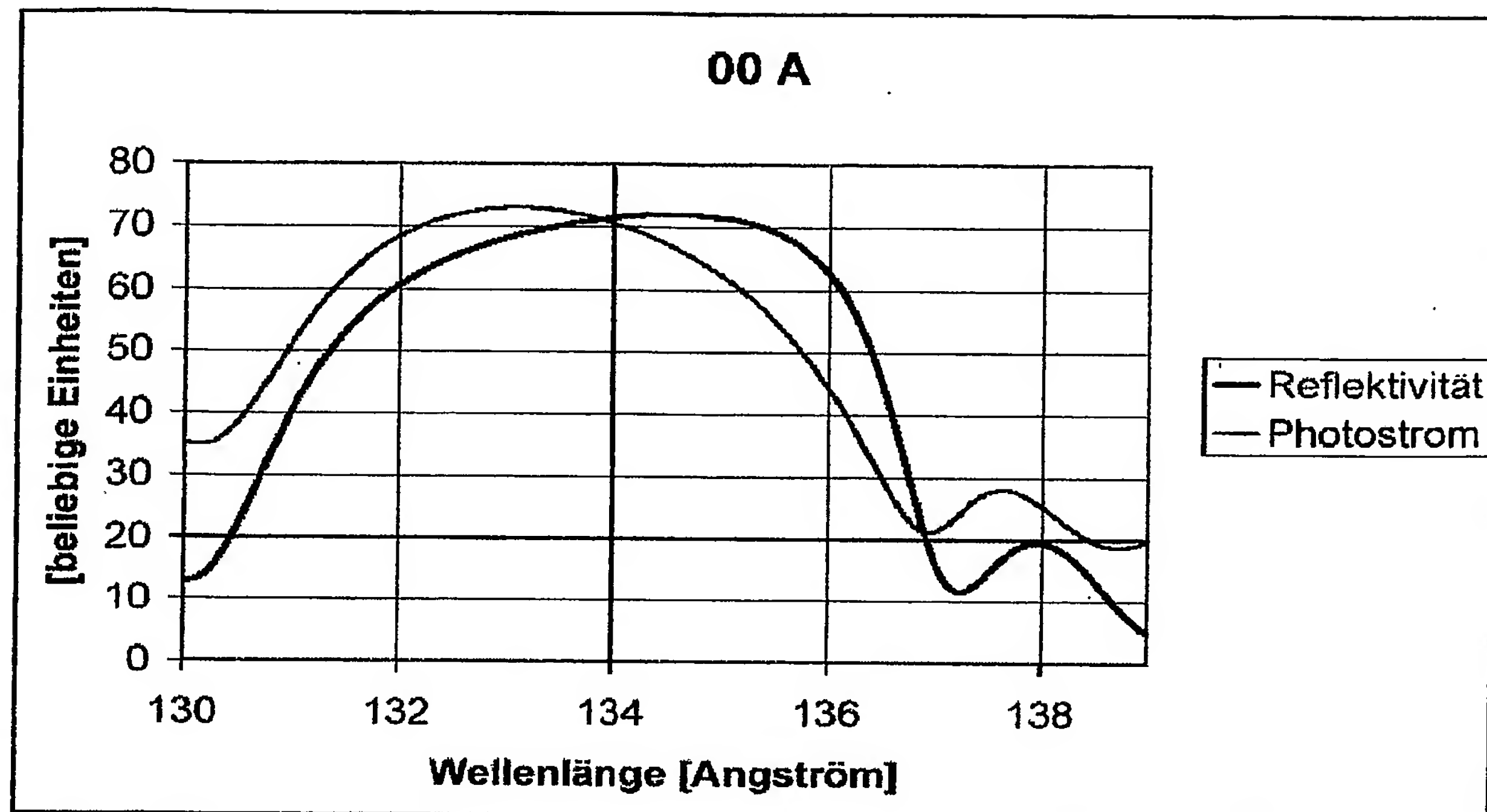
Figur 2c



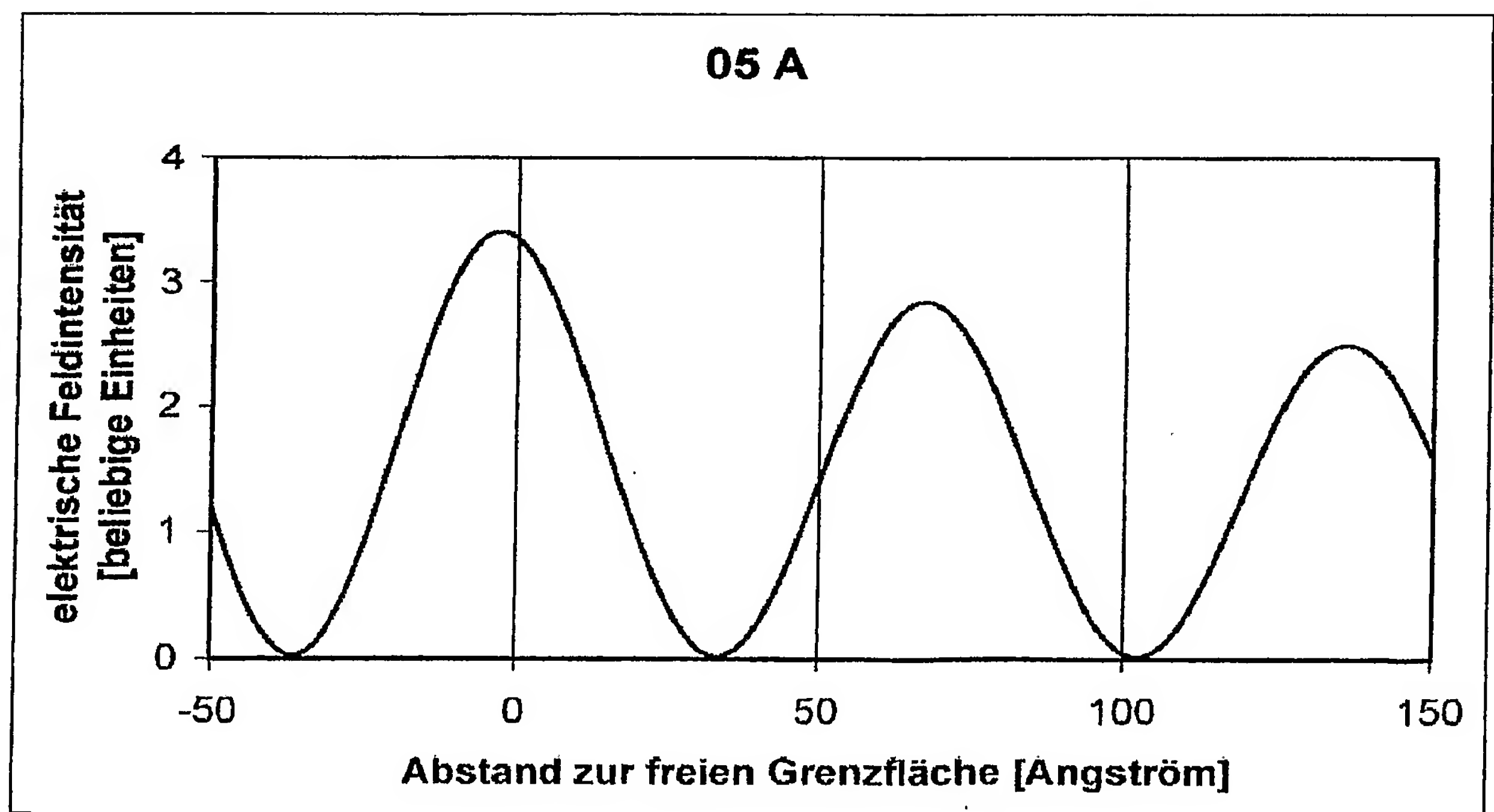
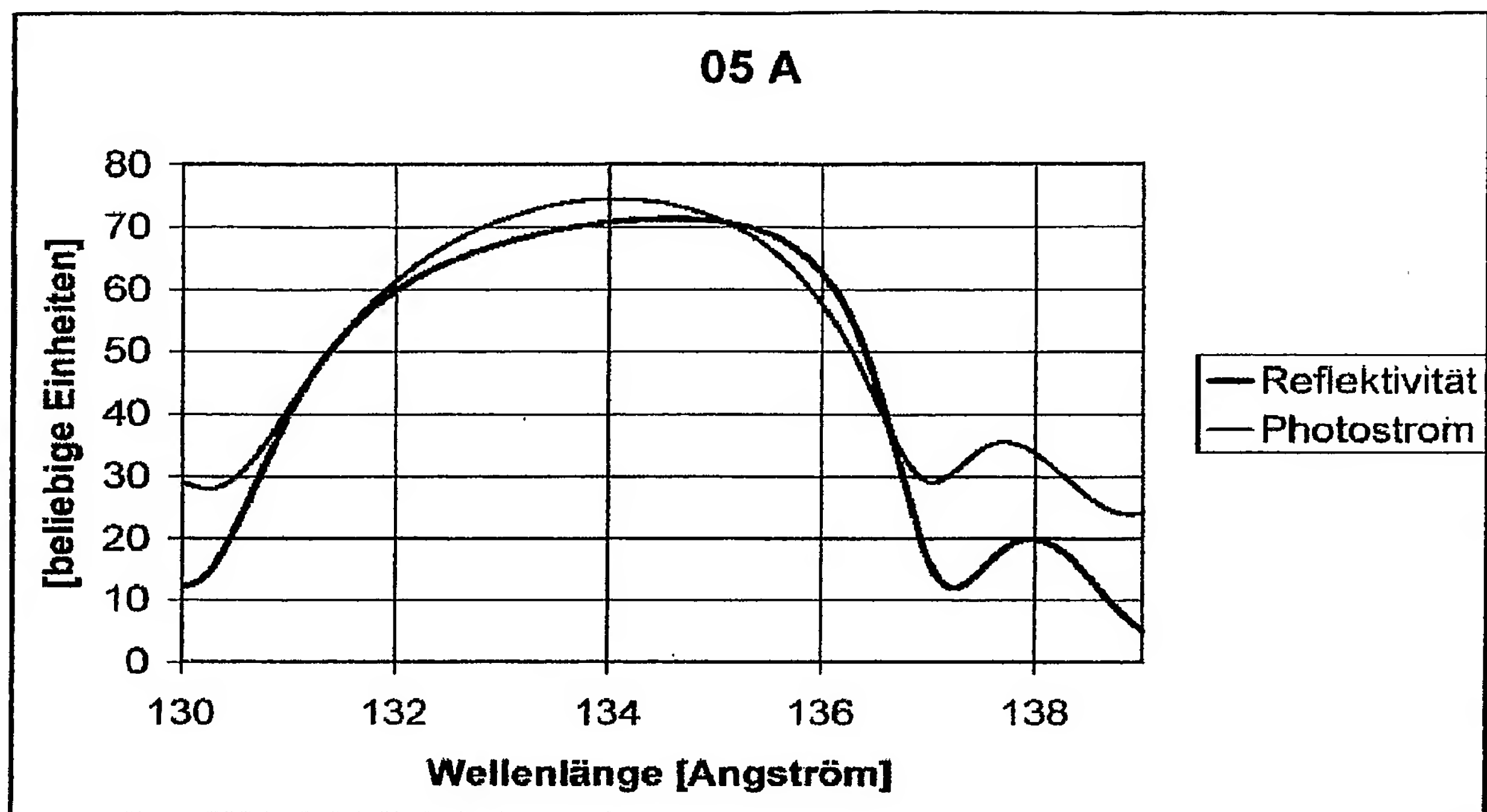
Figur 2d



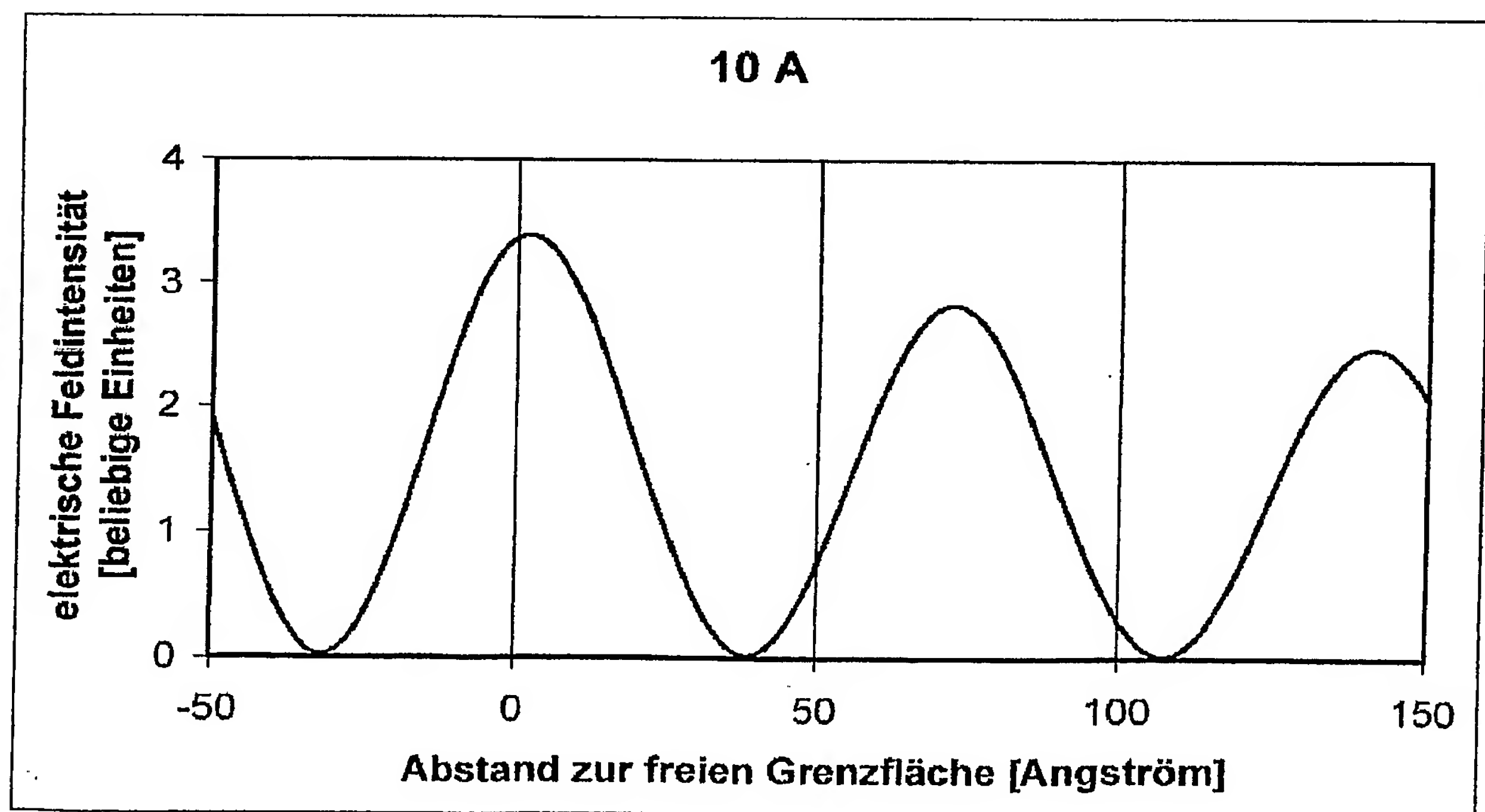
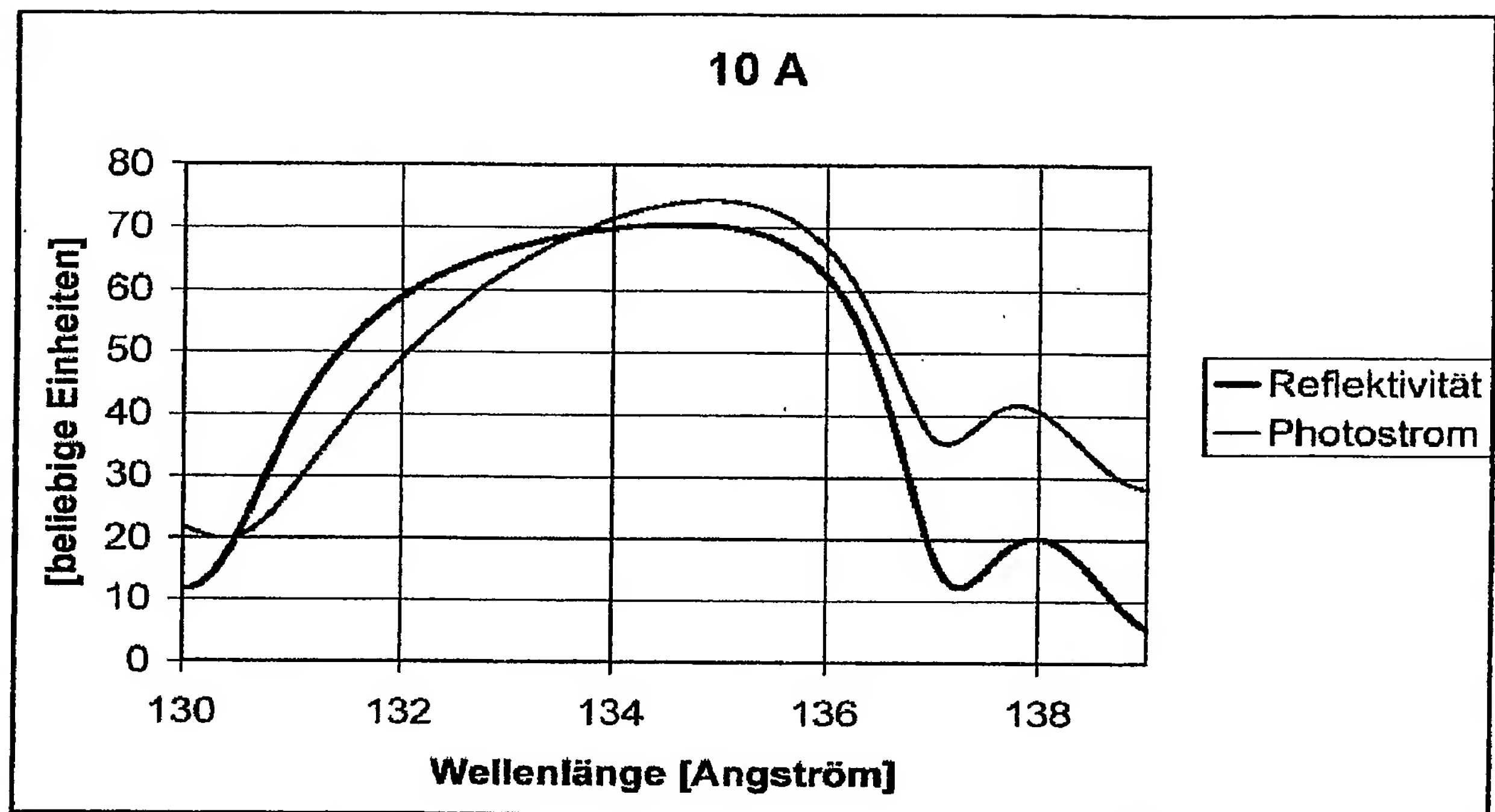
Figur 3a



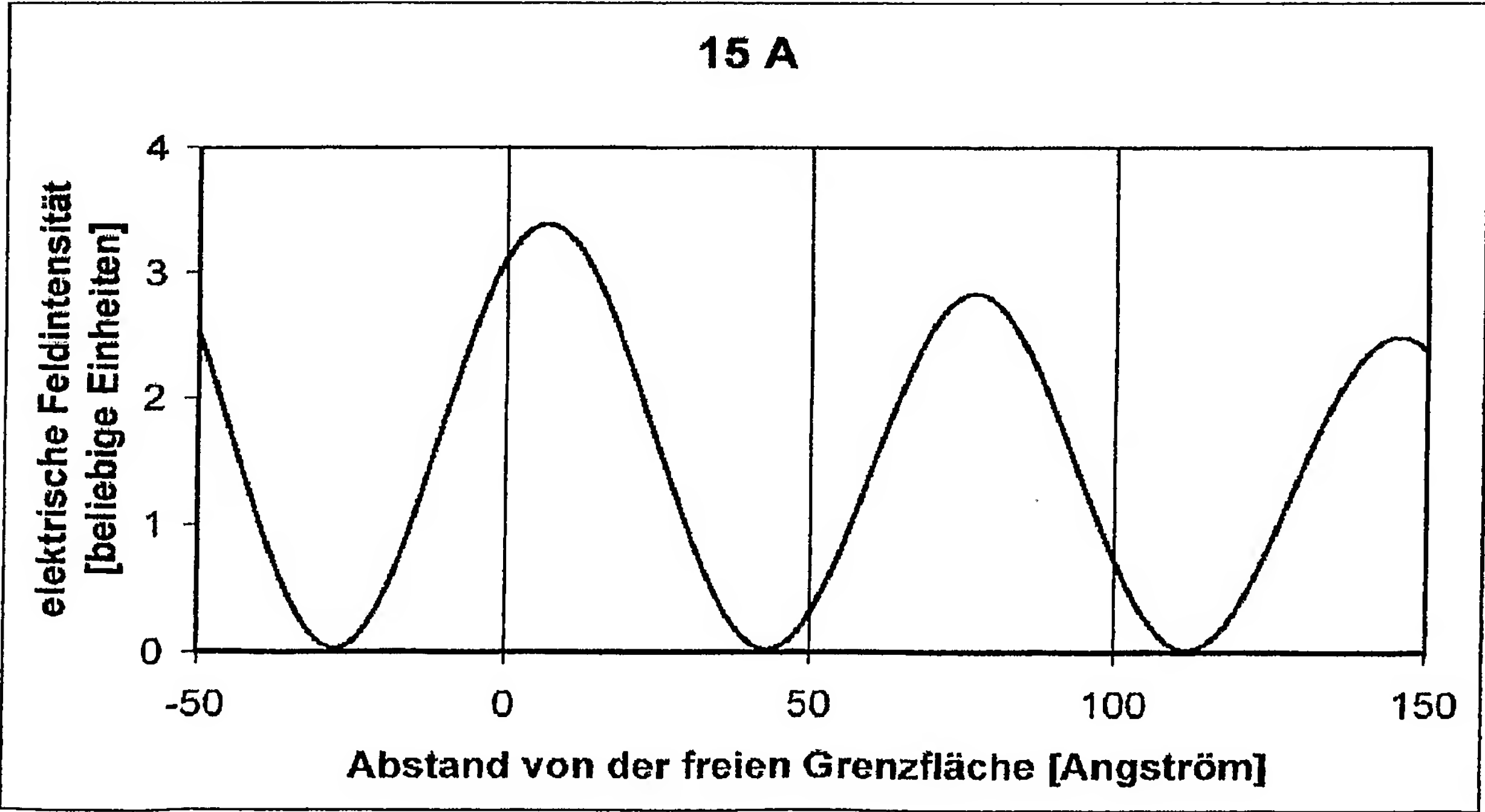
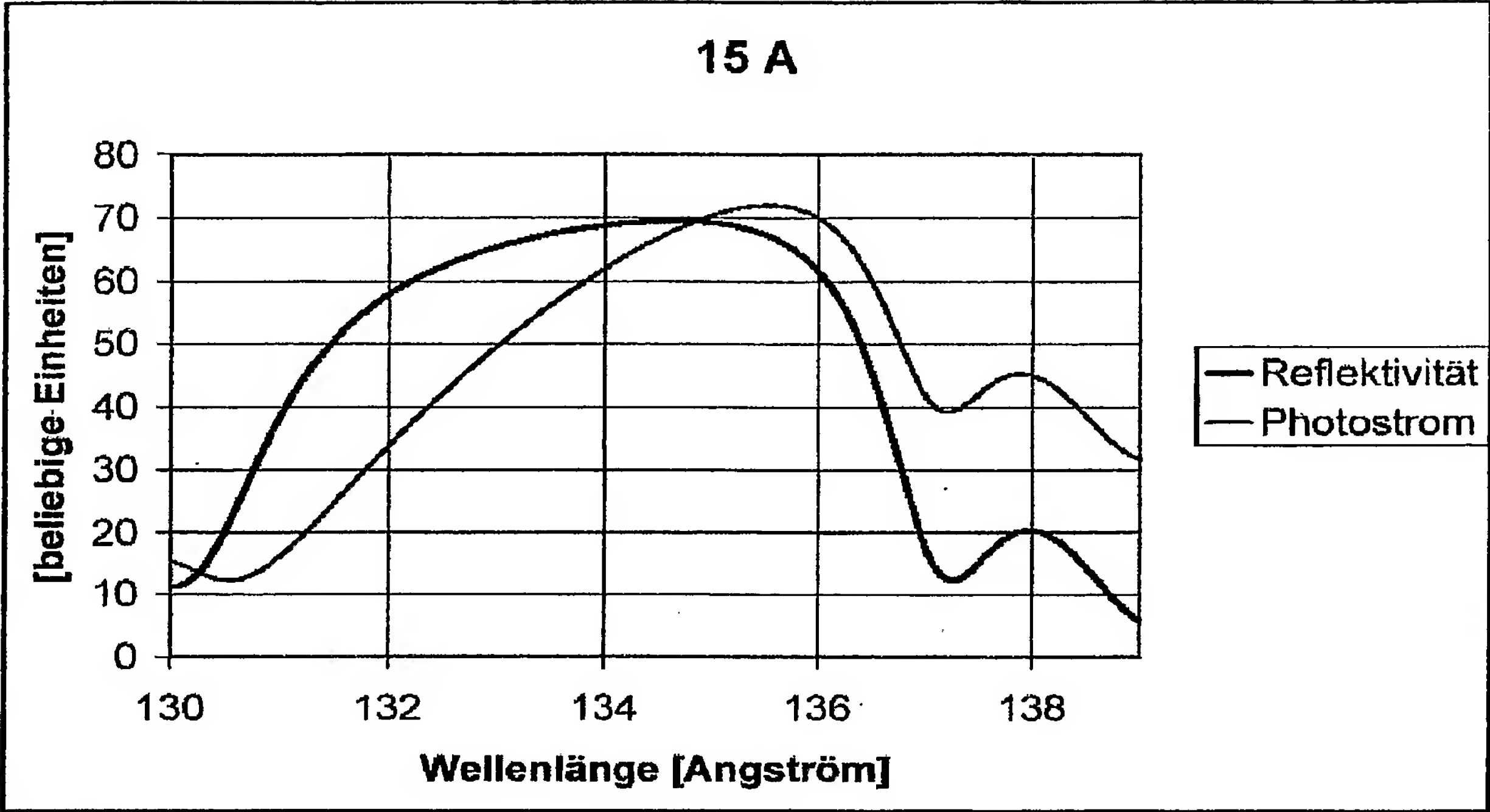
Figur 3b



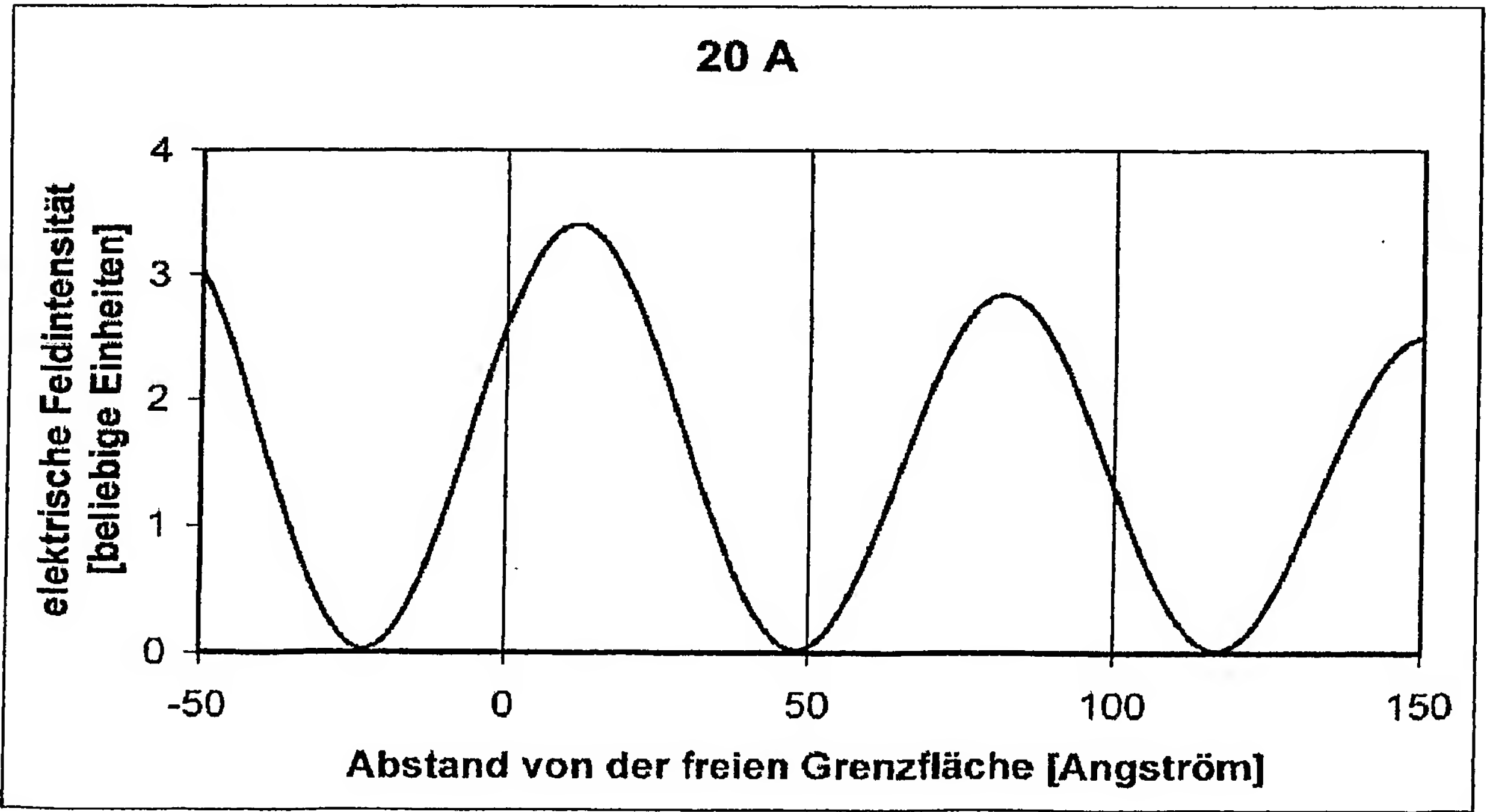
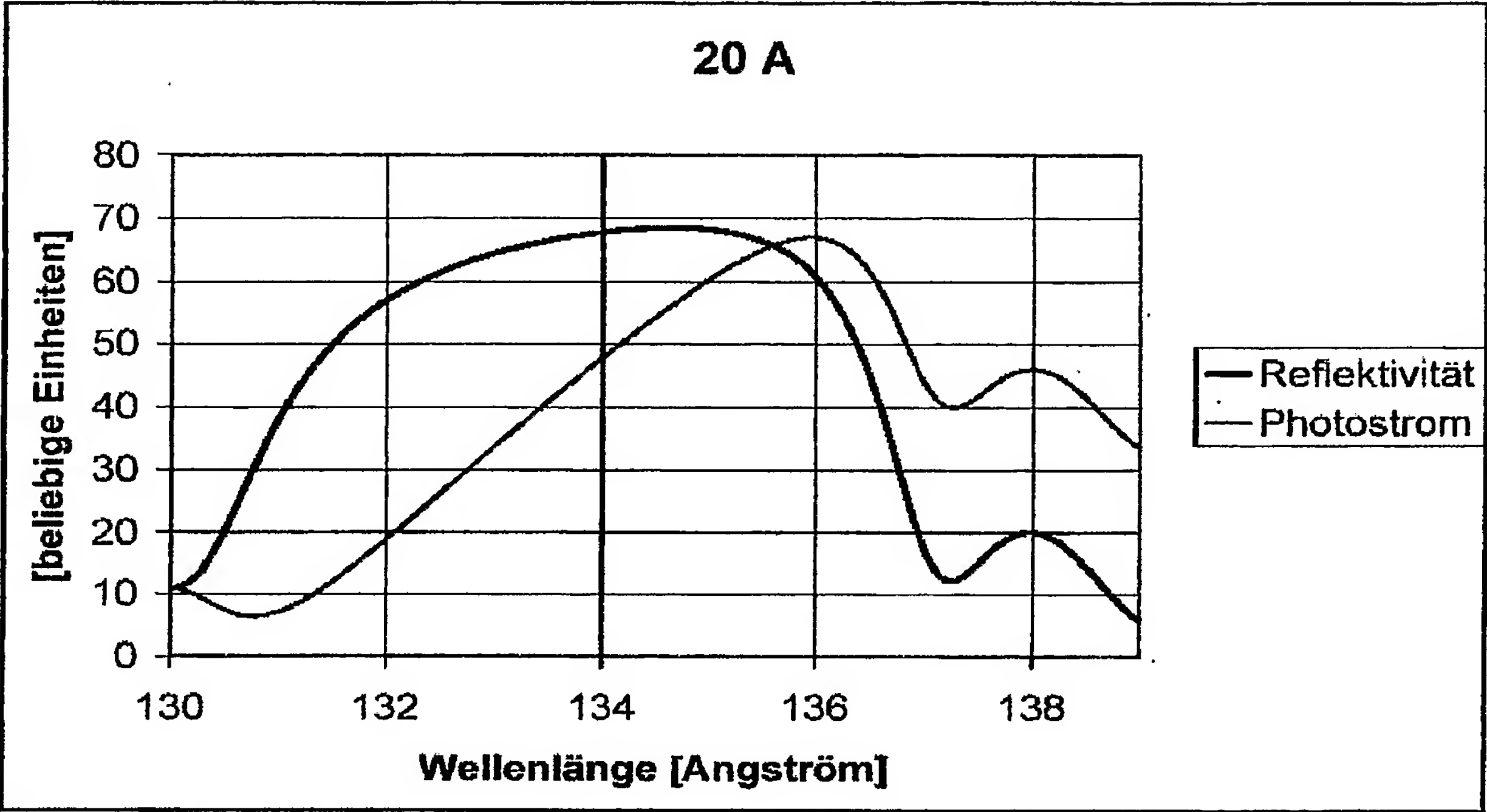
Figur 3c



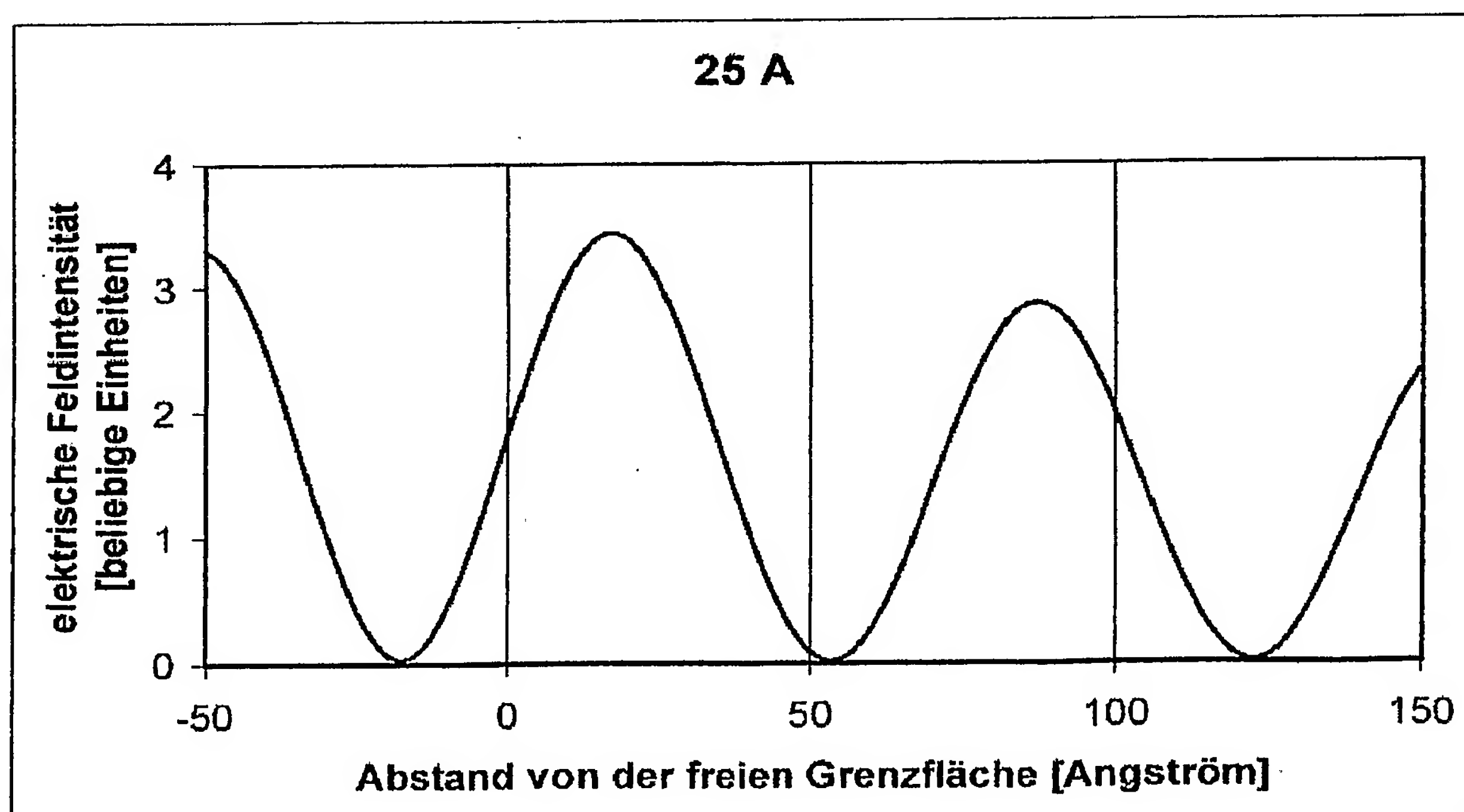
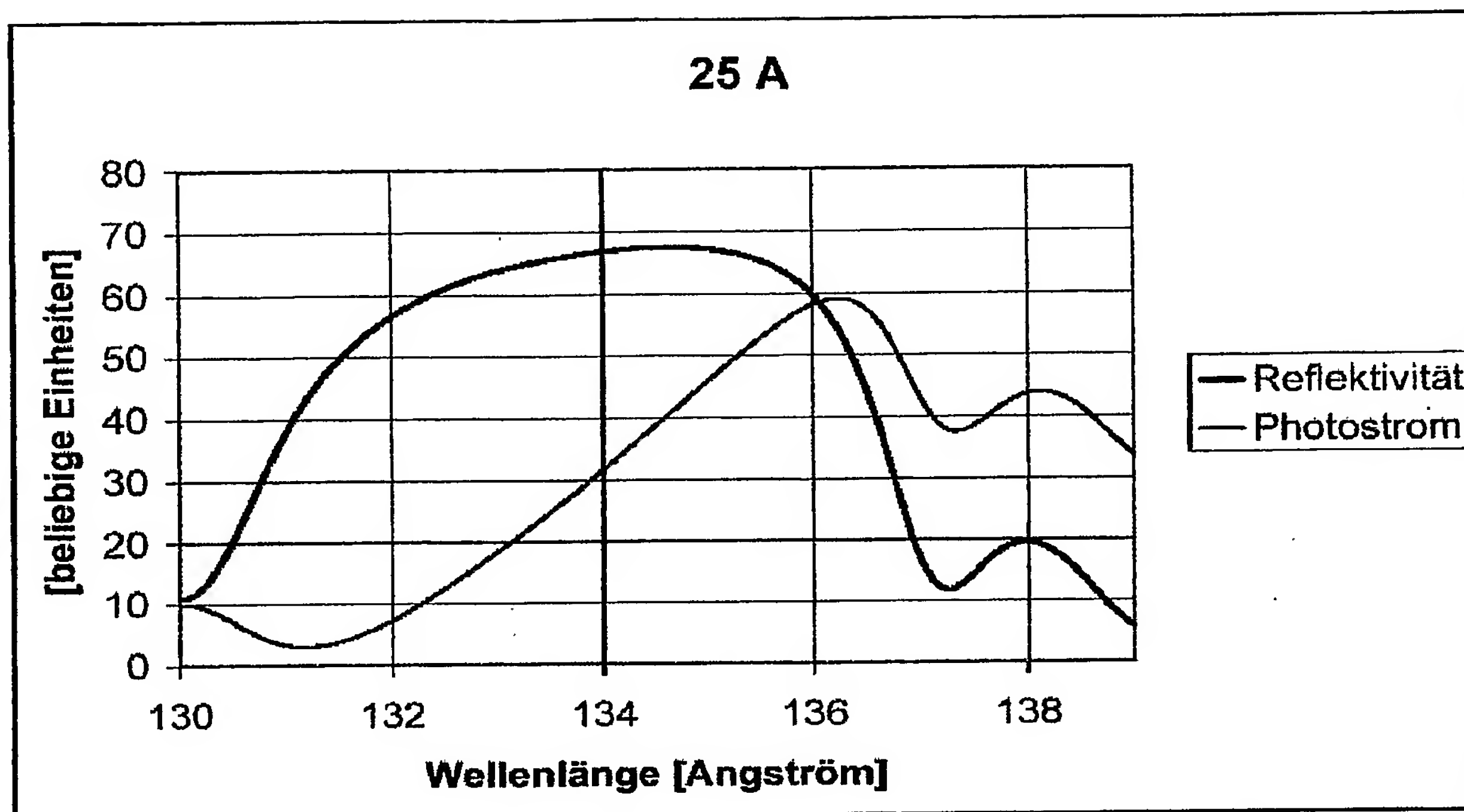
Figur 3d



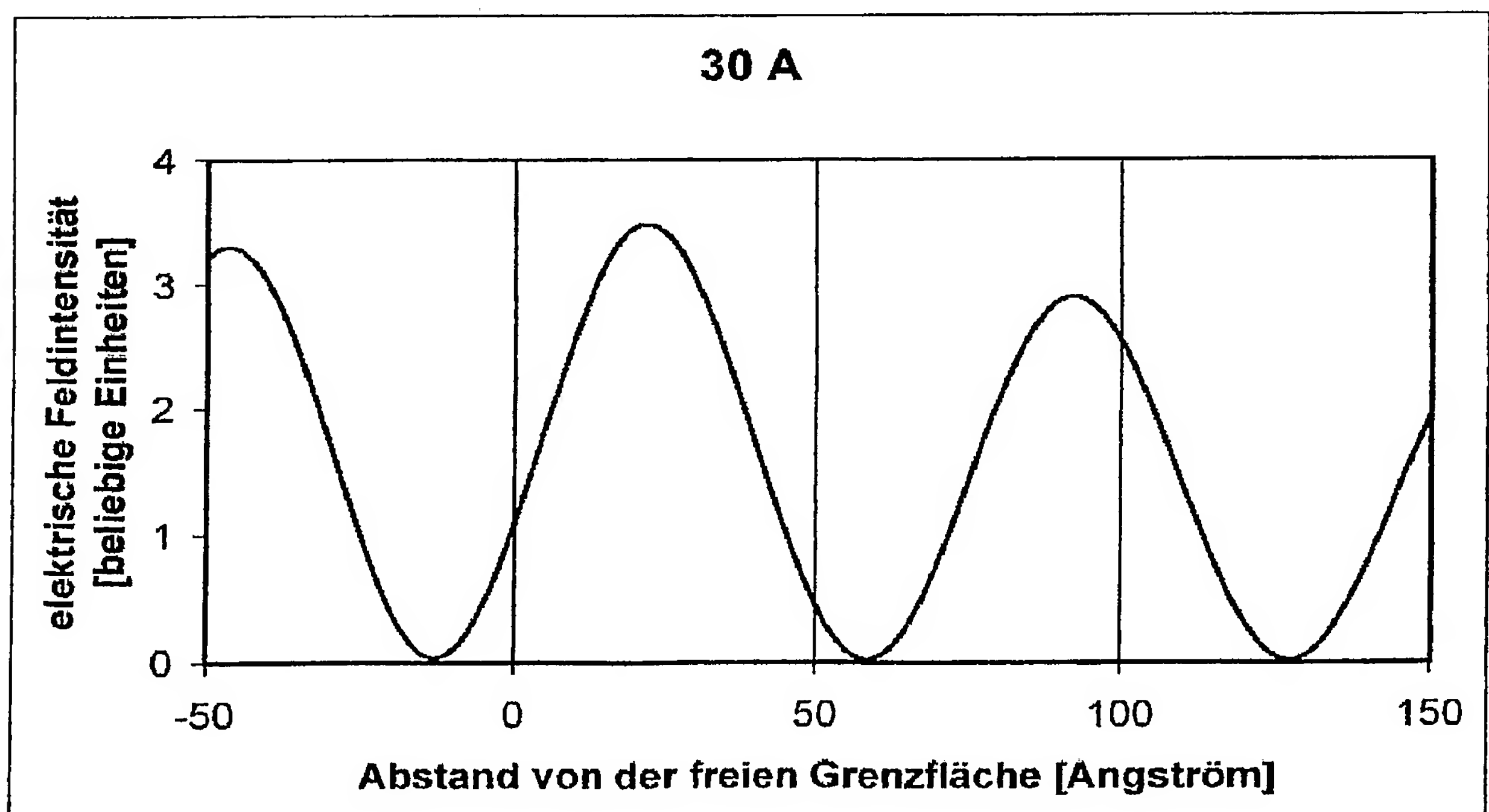
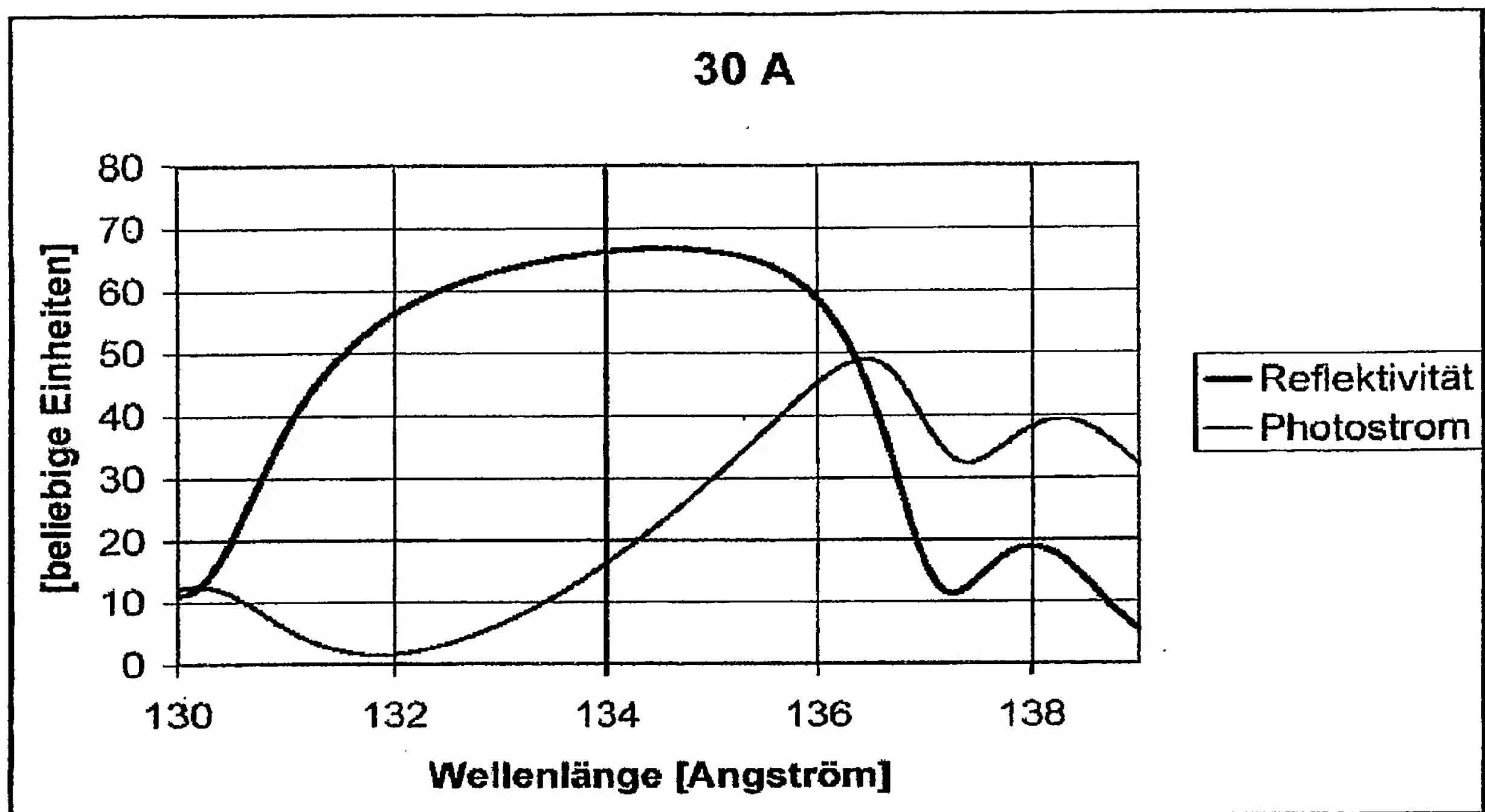
Figur 3e



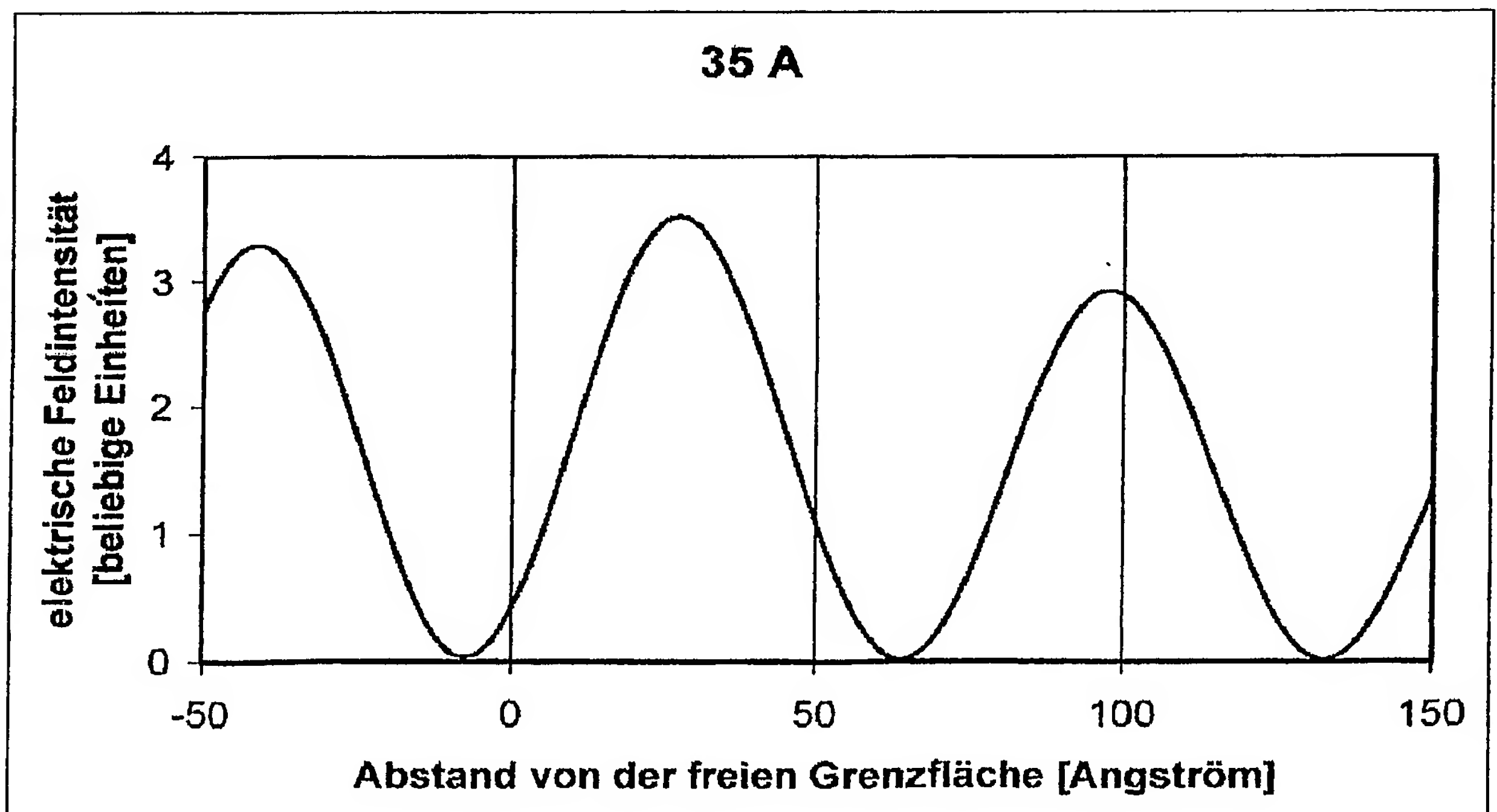
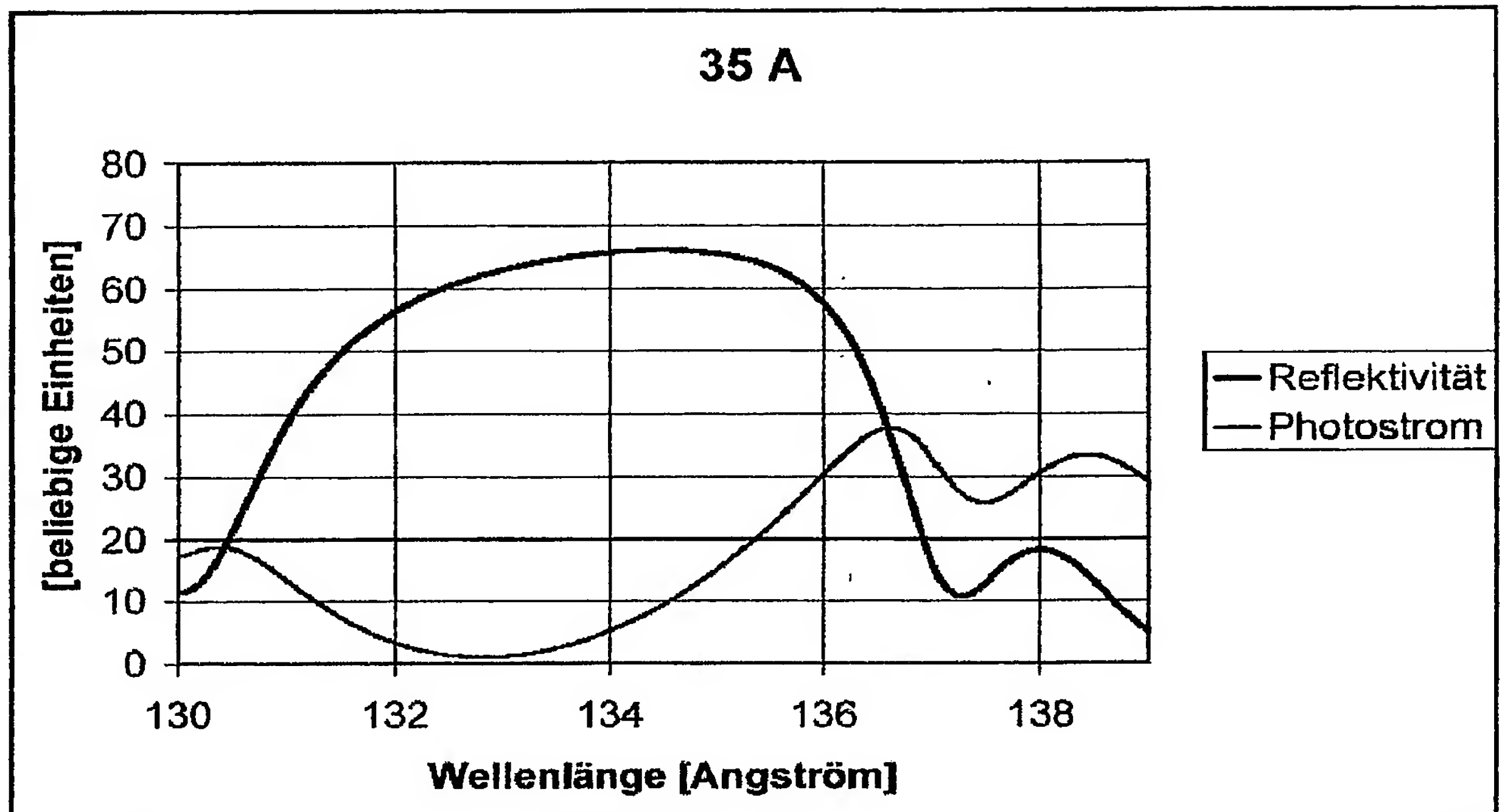
Figur 3f



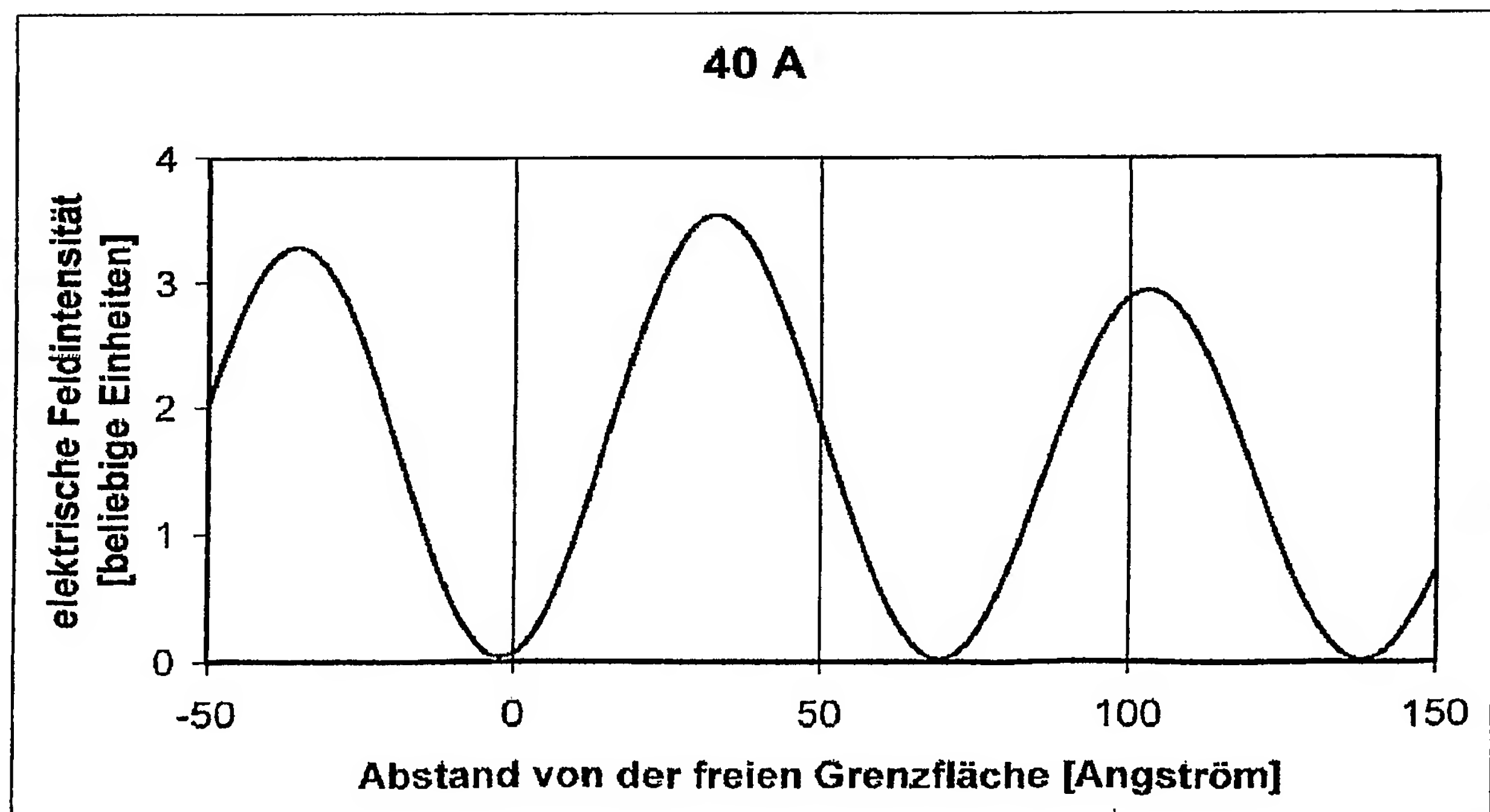
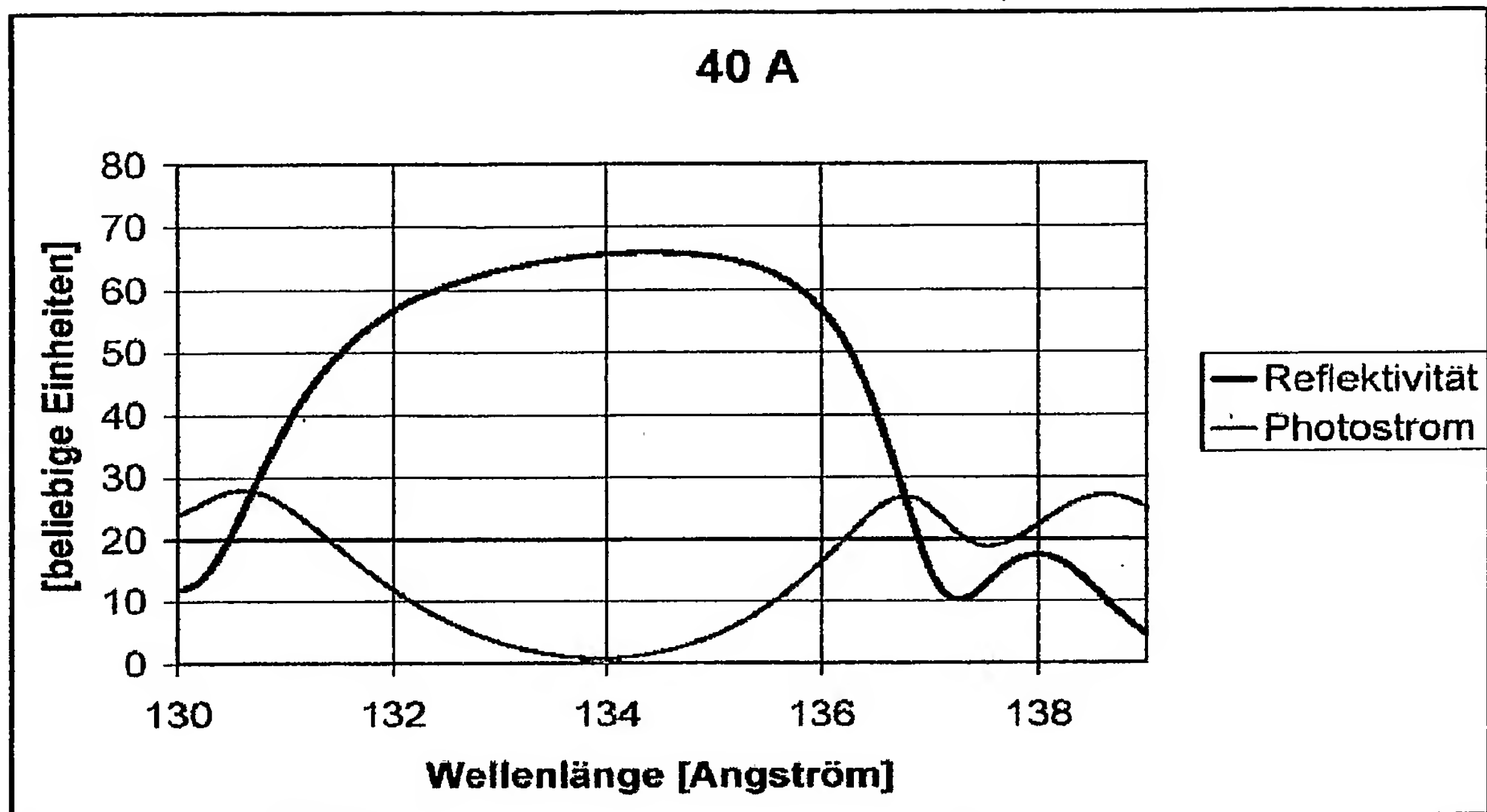
Figur 3g



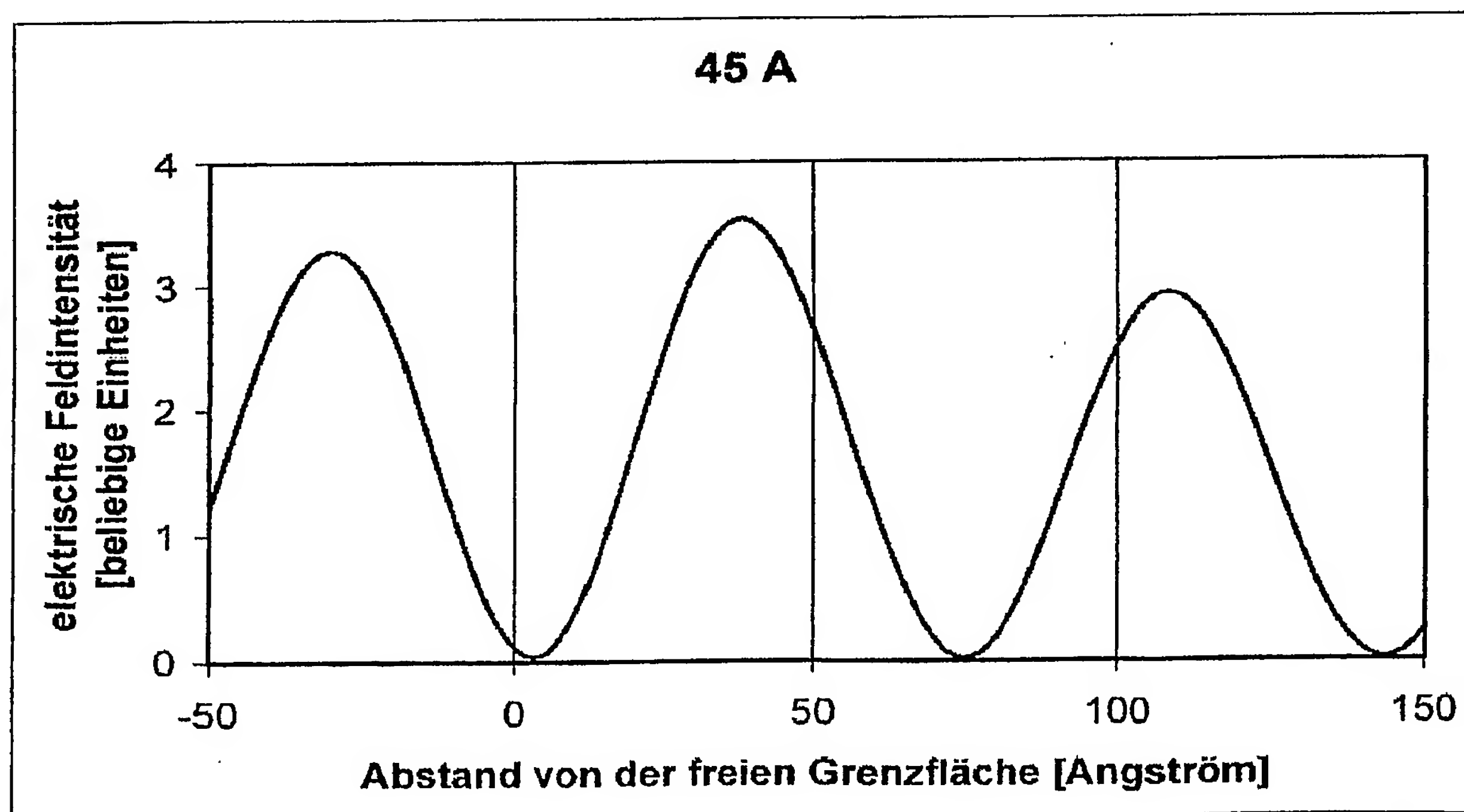
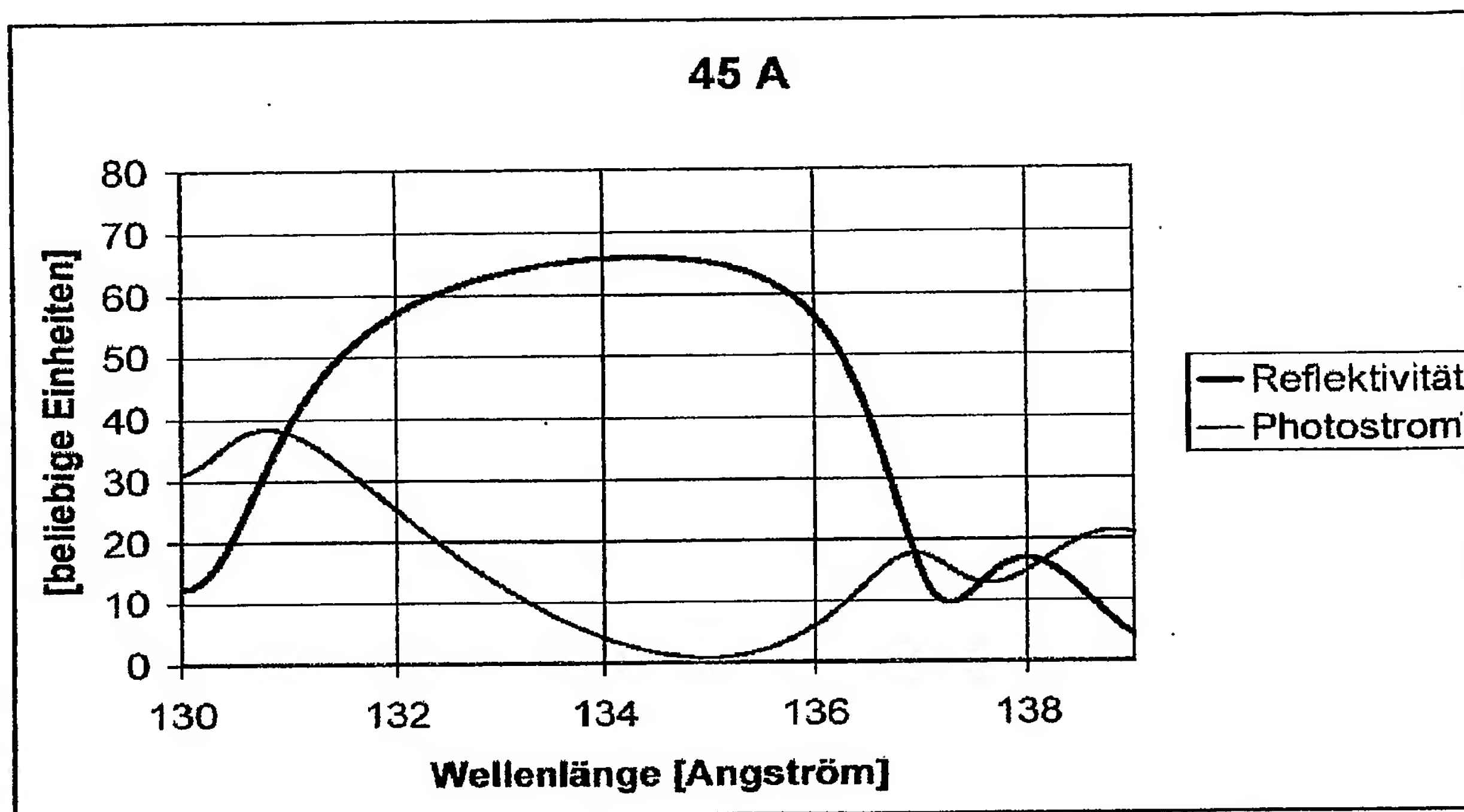
Figur 3h



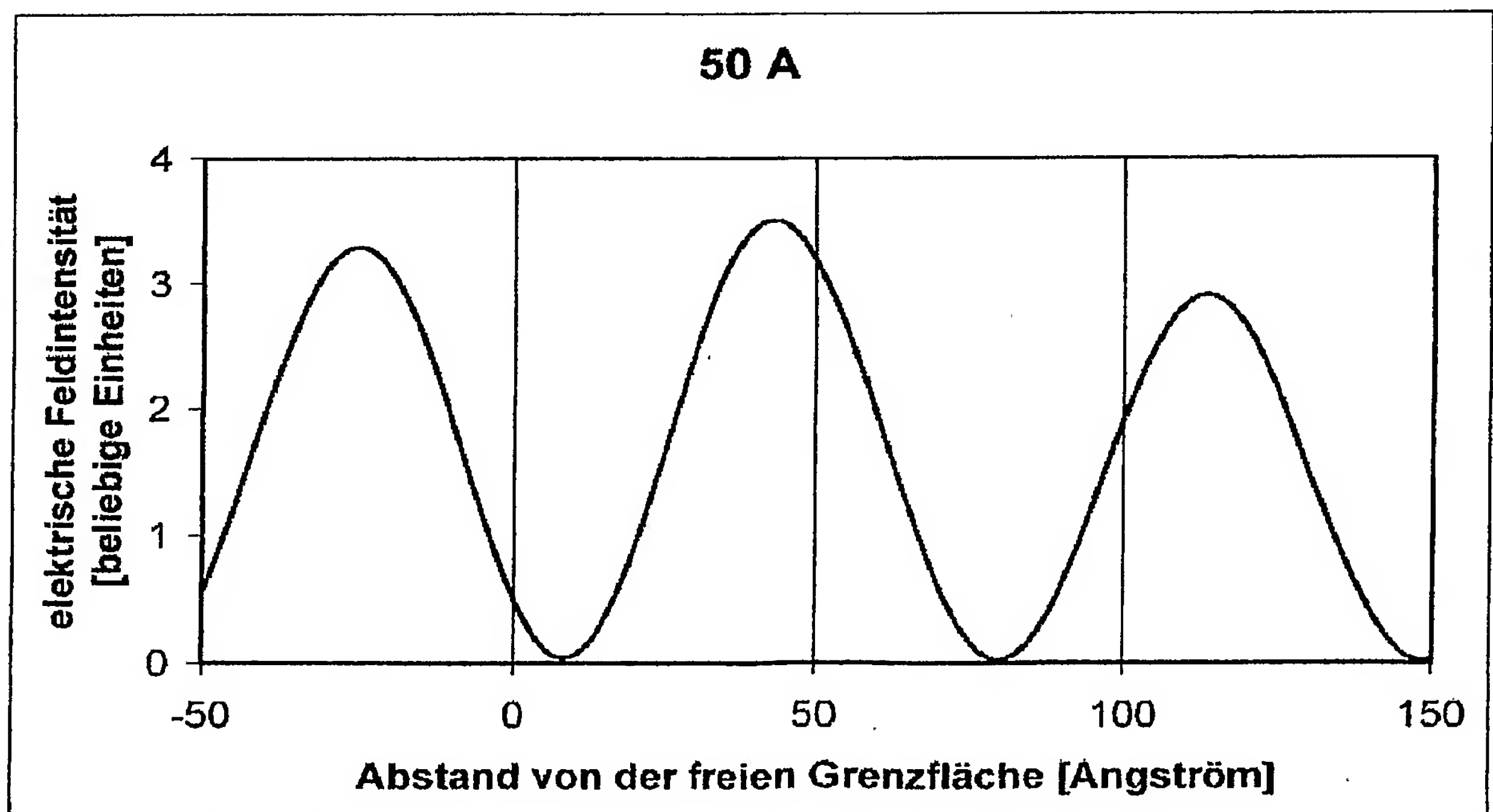
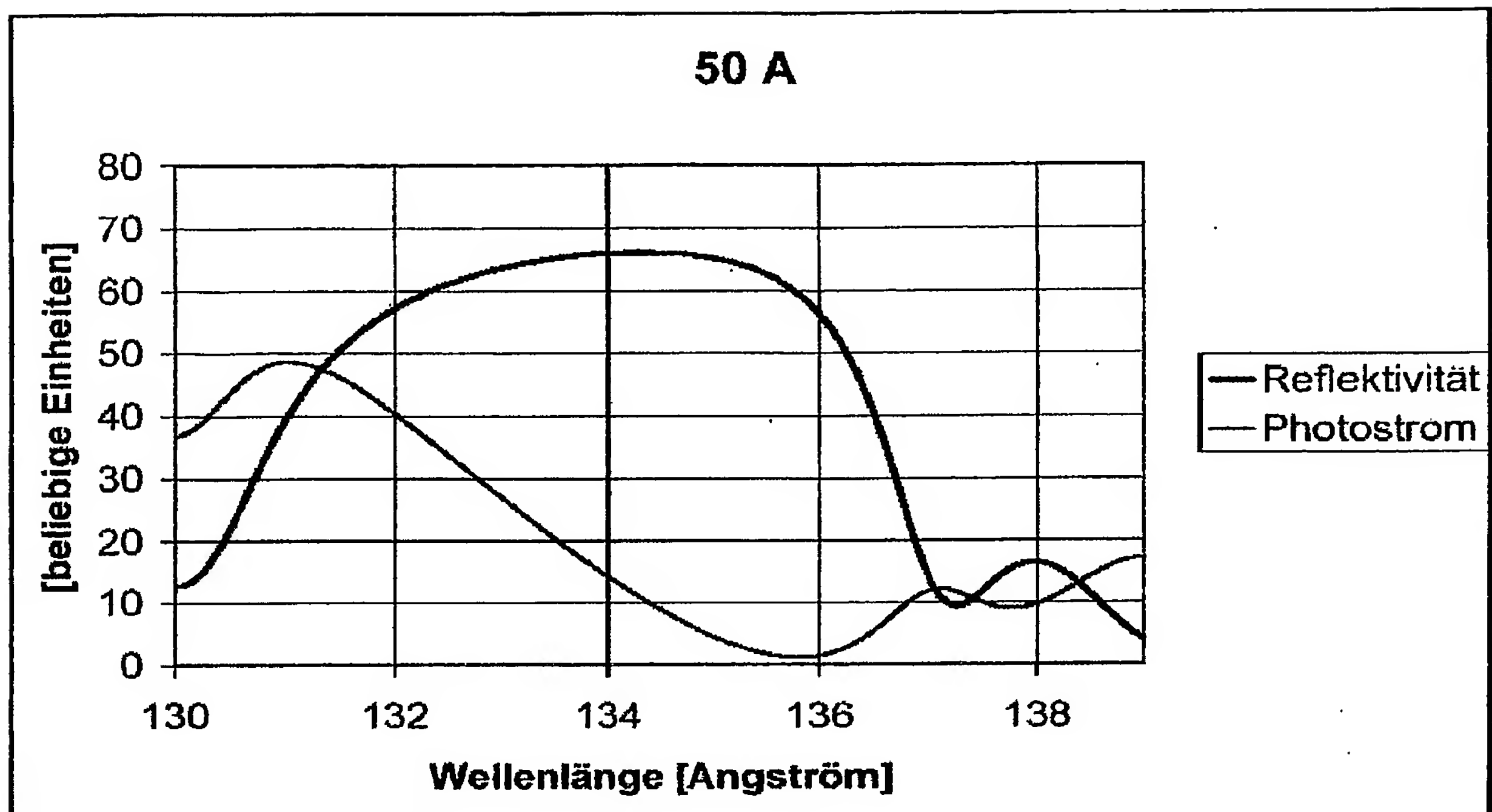
Figur 3i



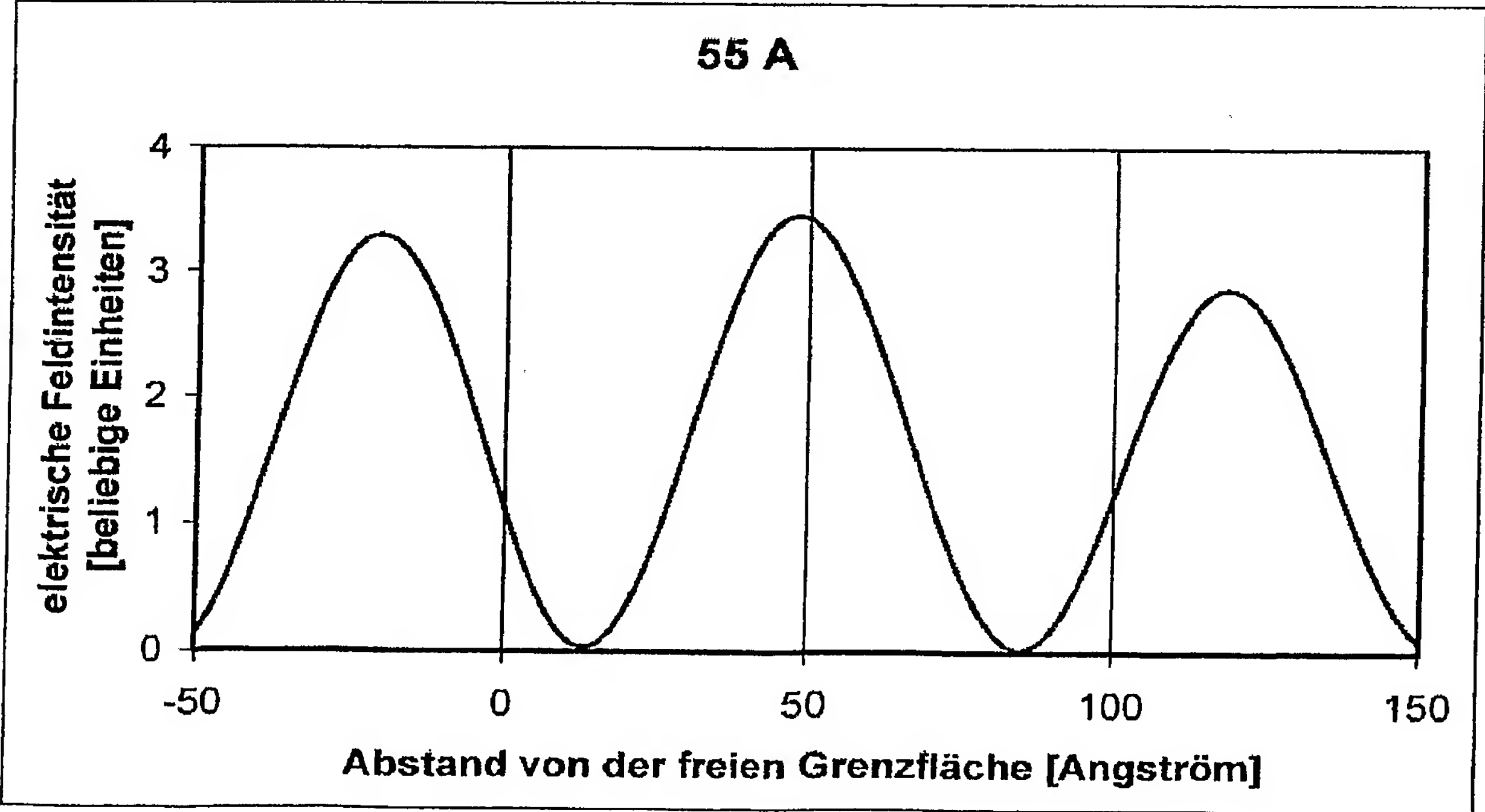
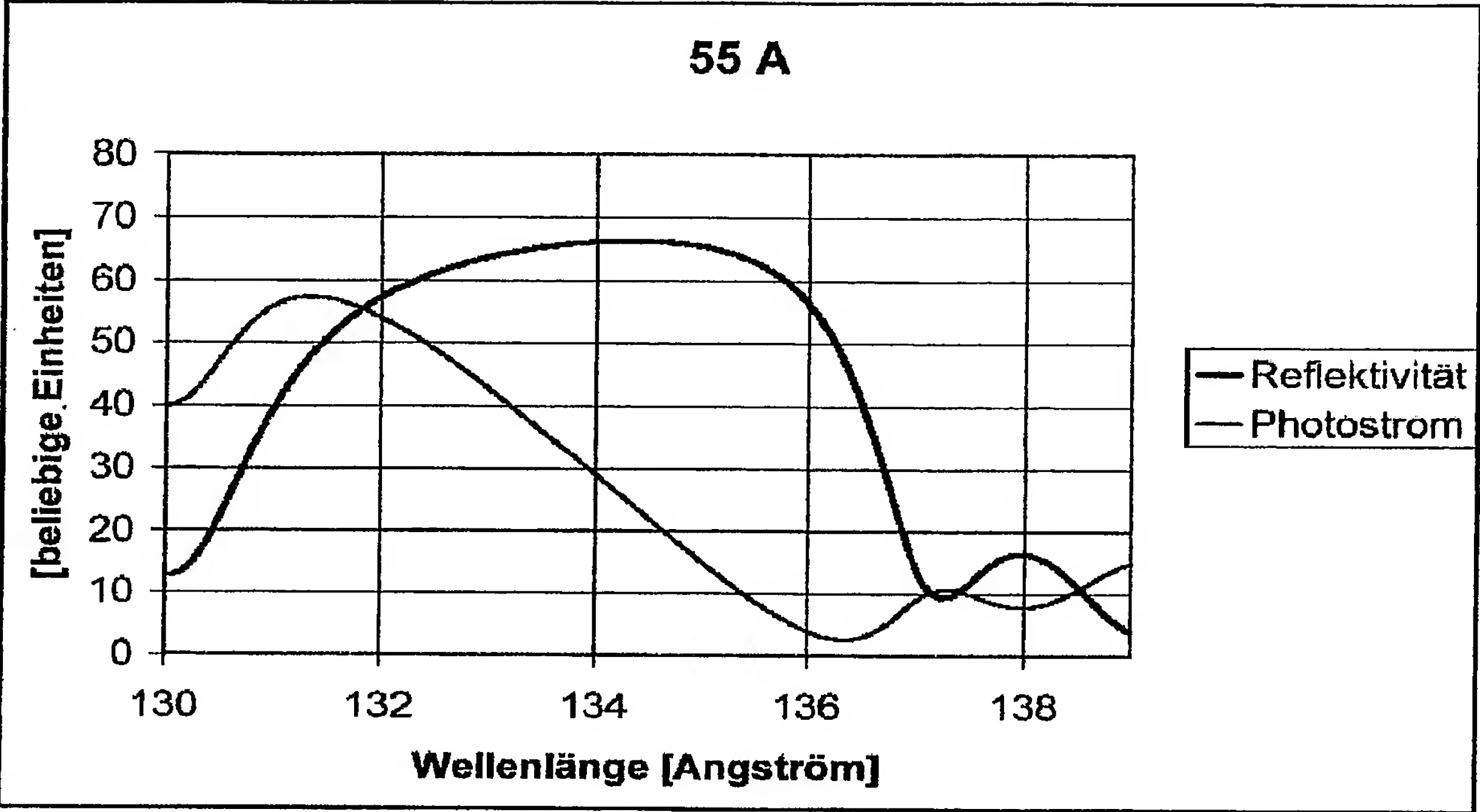
Figur 3j



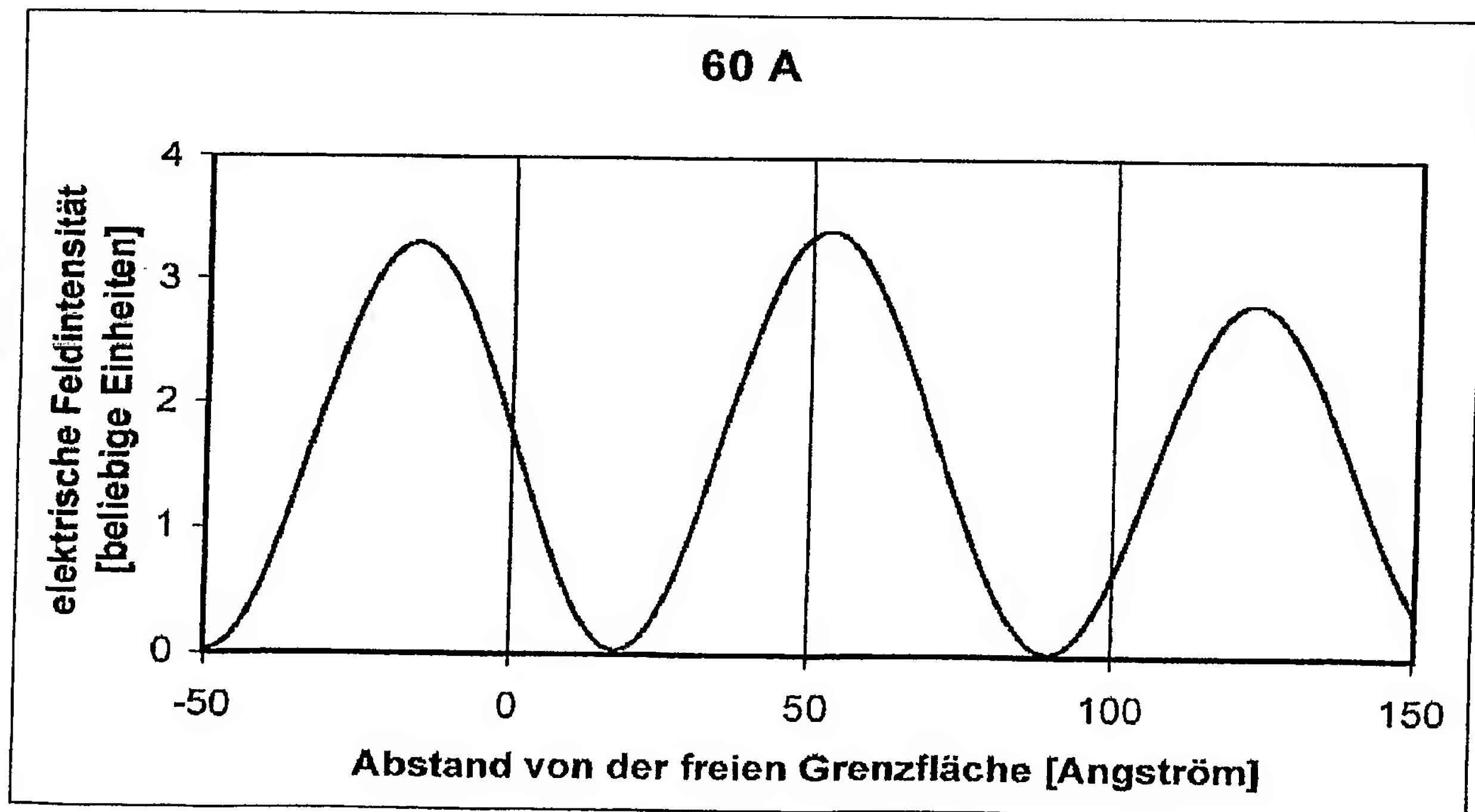
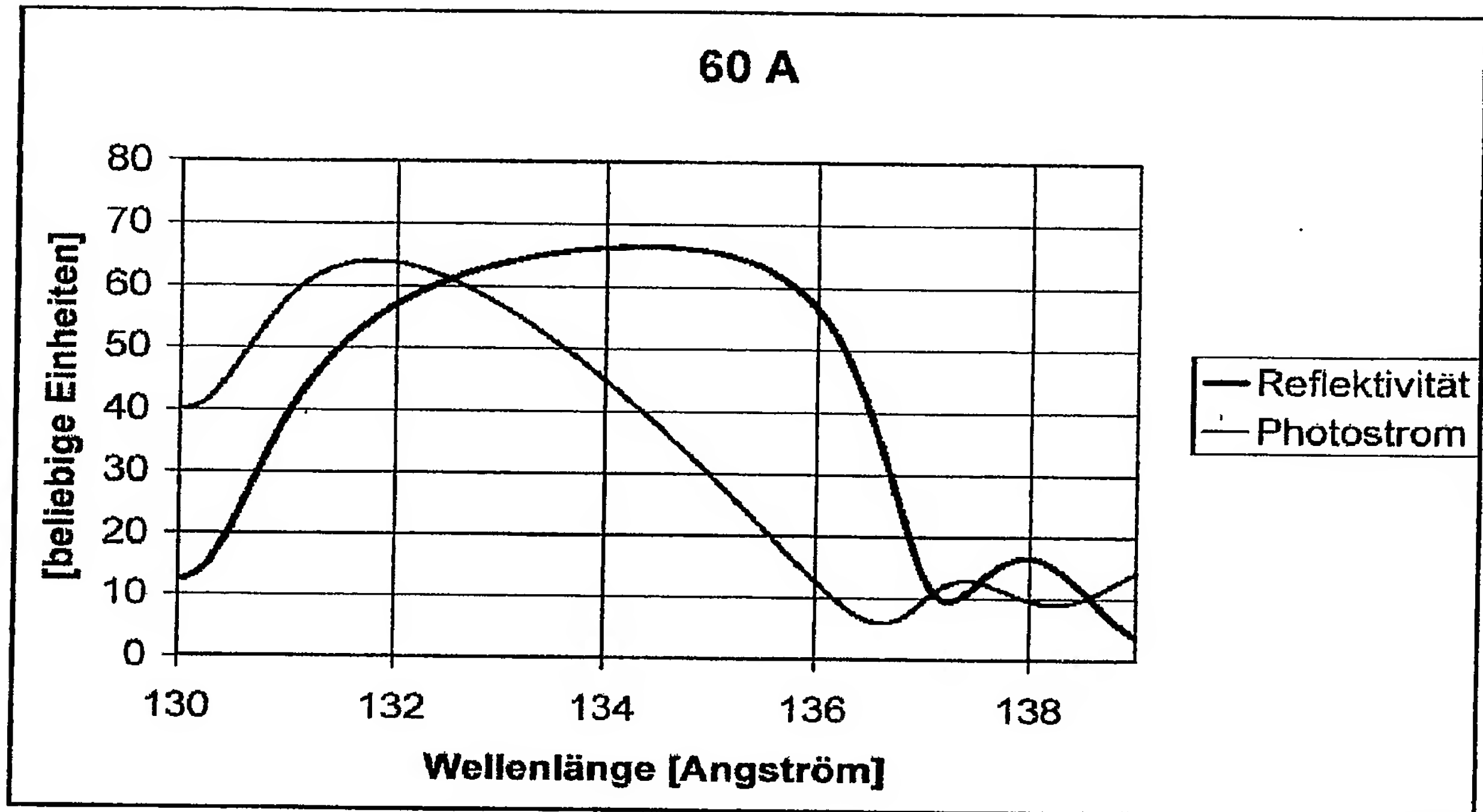
Figur 3k



Figur 3l



Figur 3m



Figur 3n

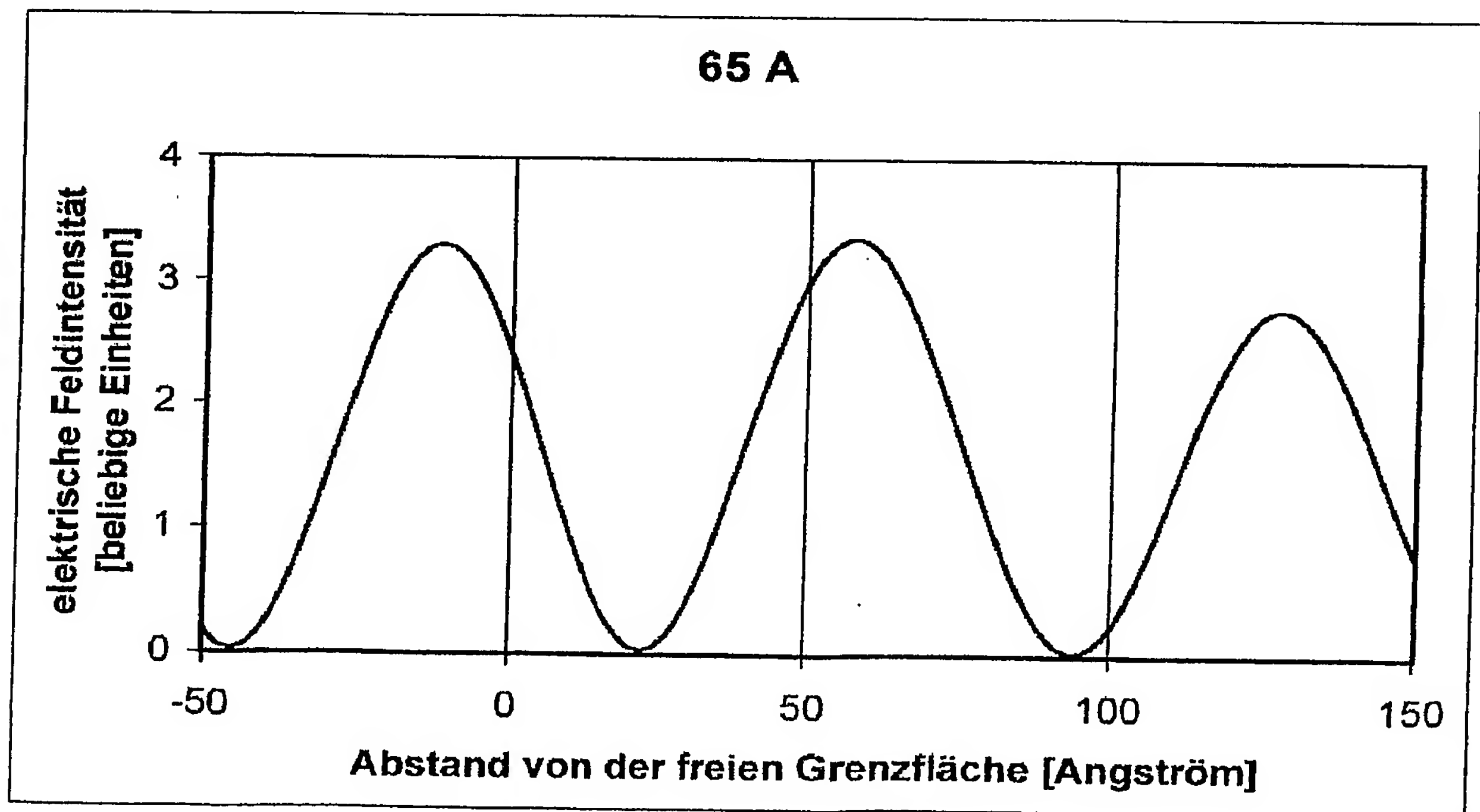
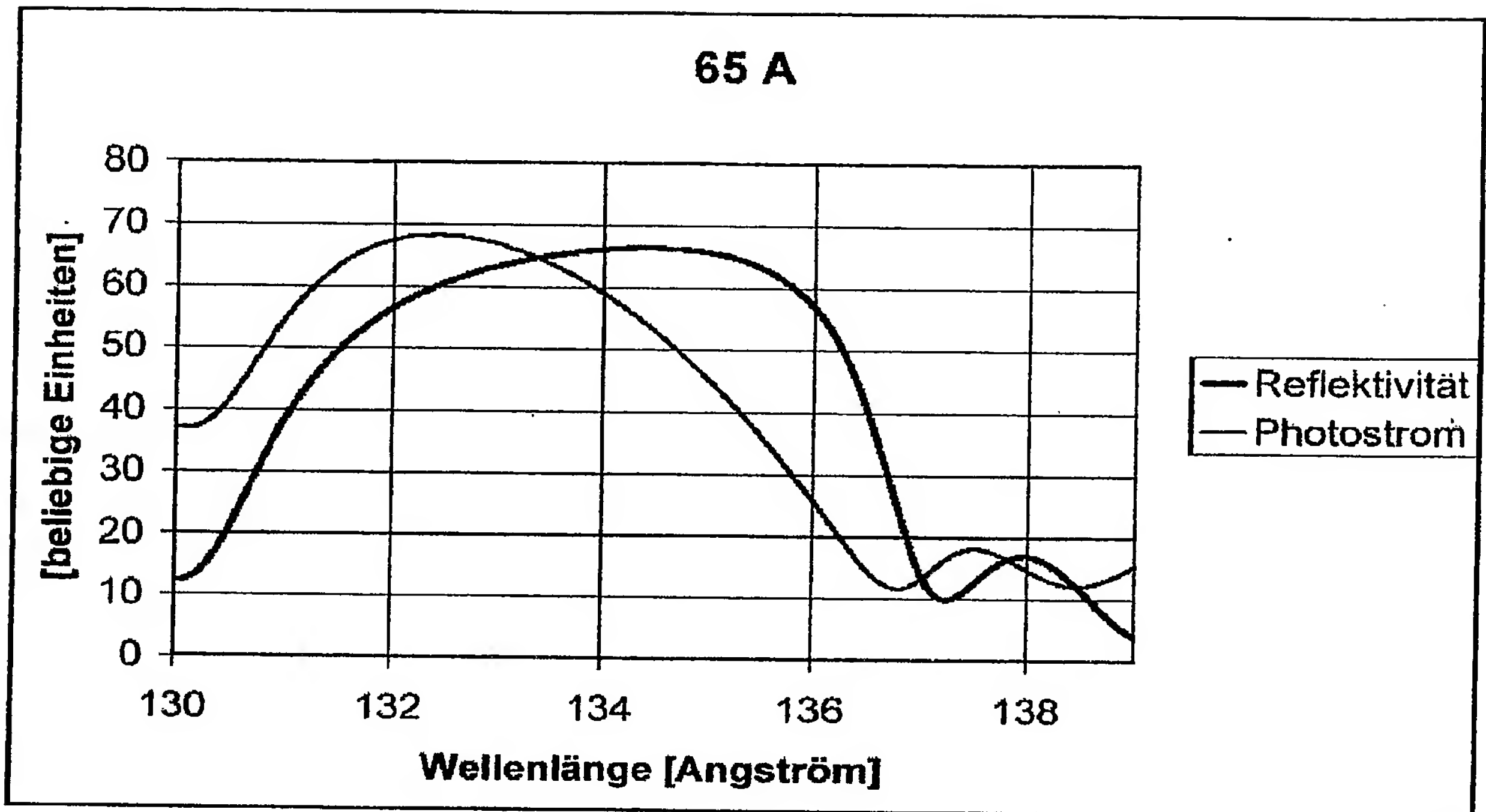
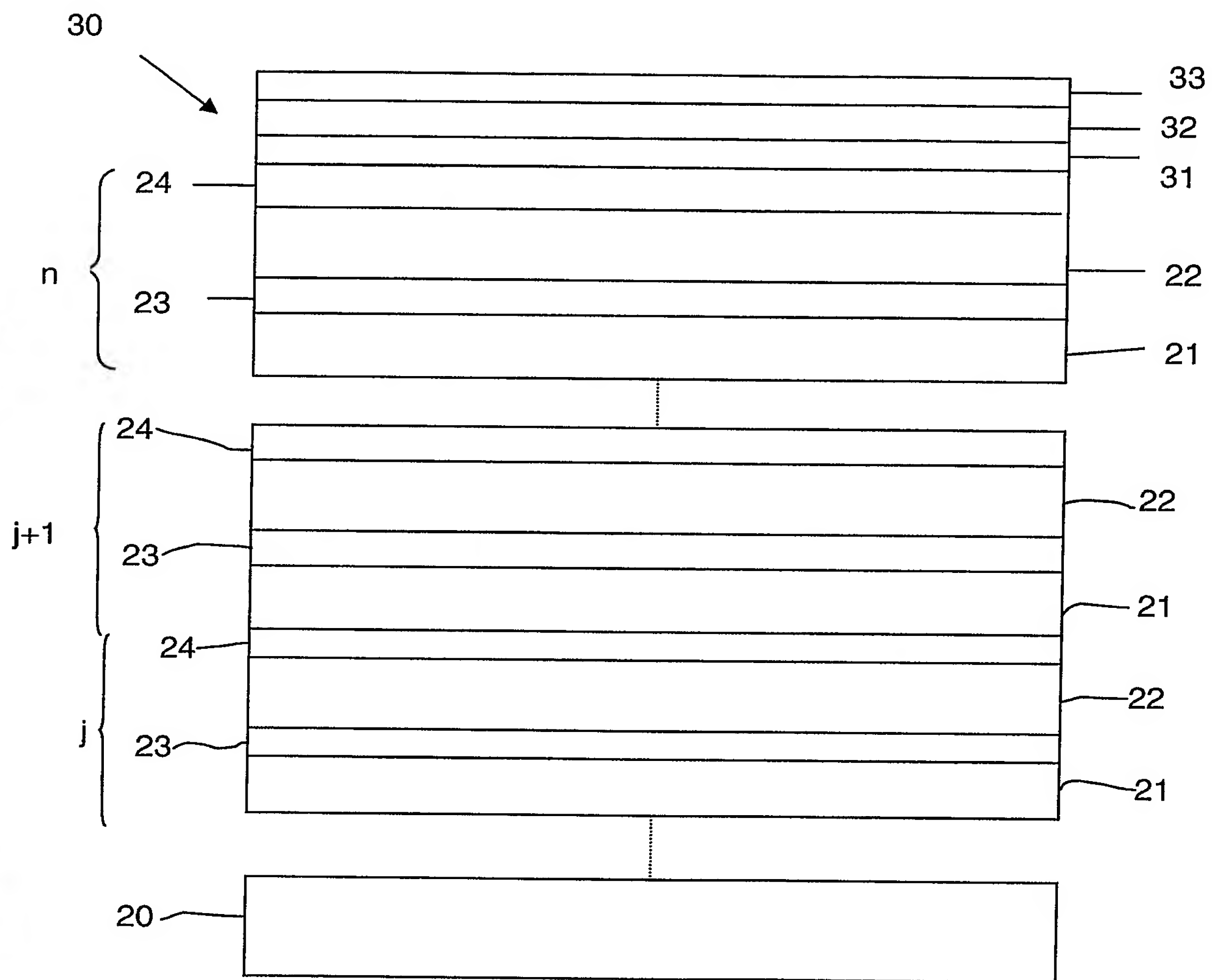
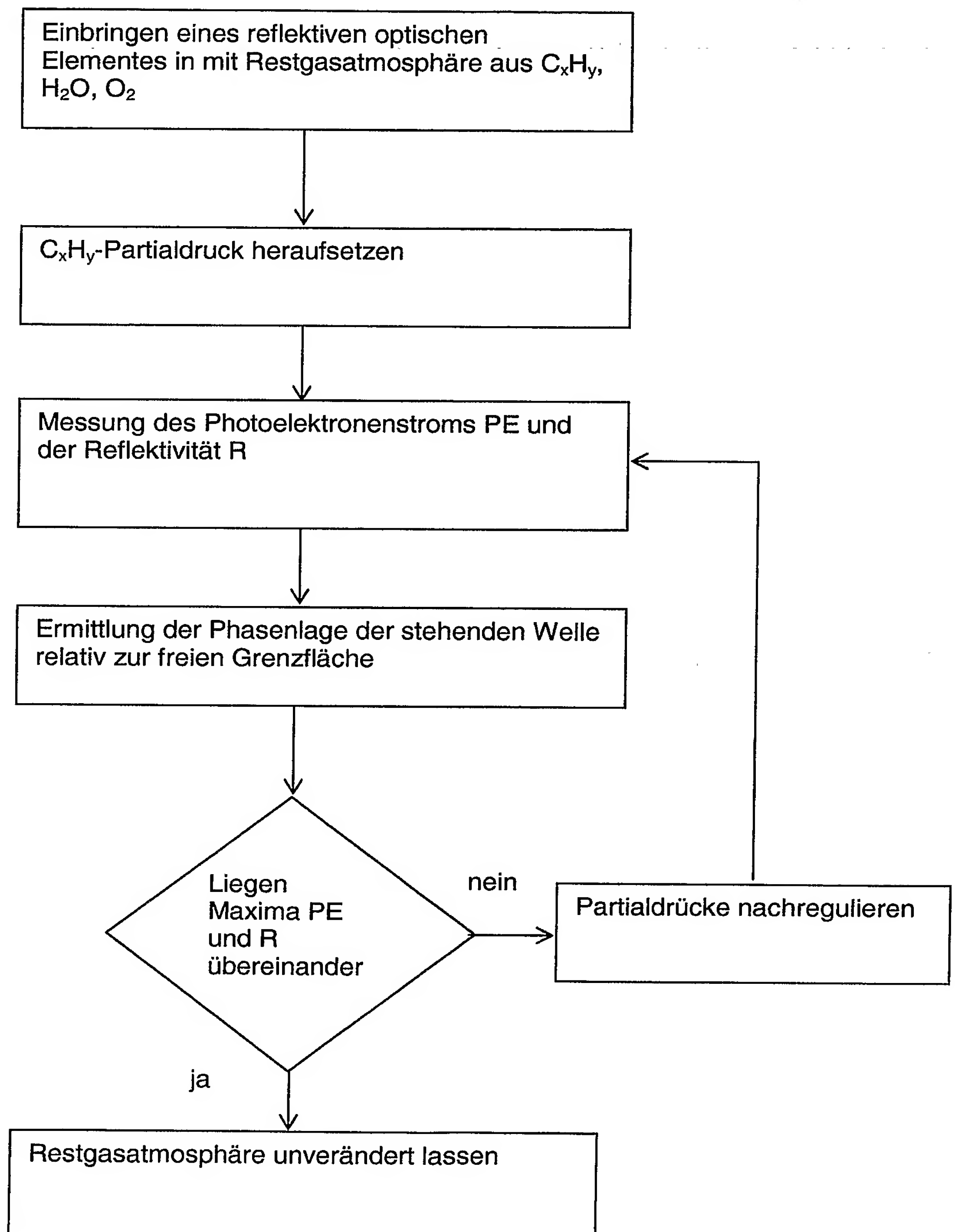


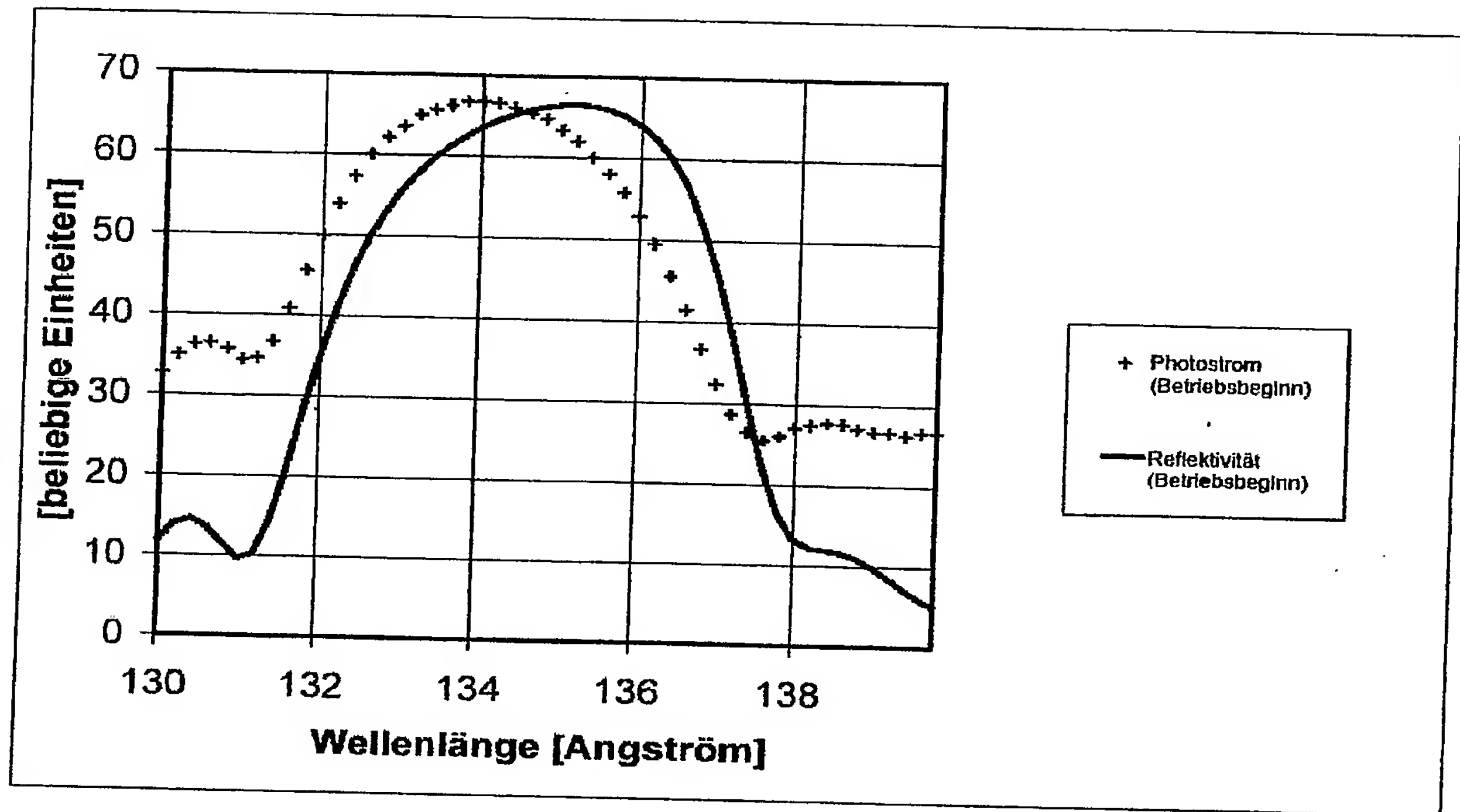
Fig. 4



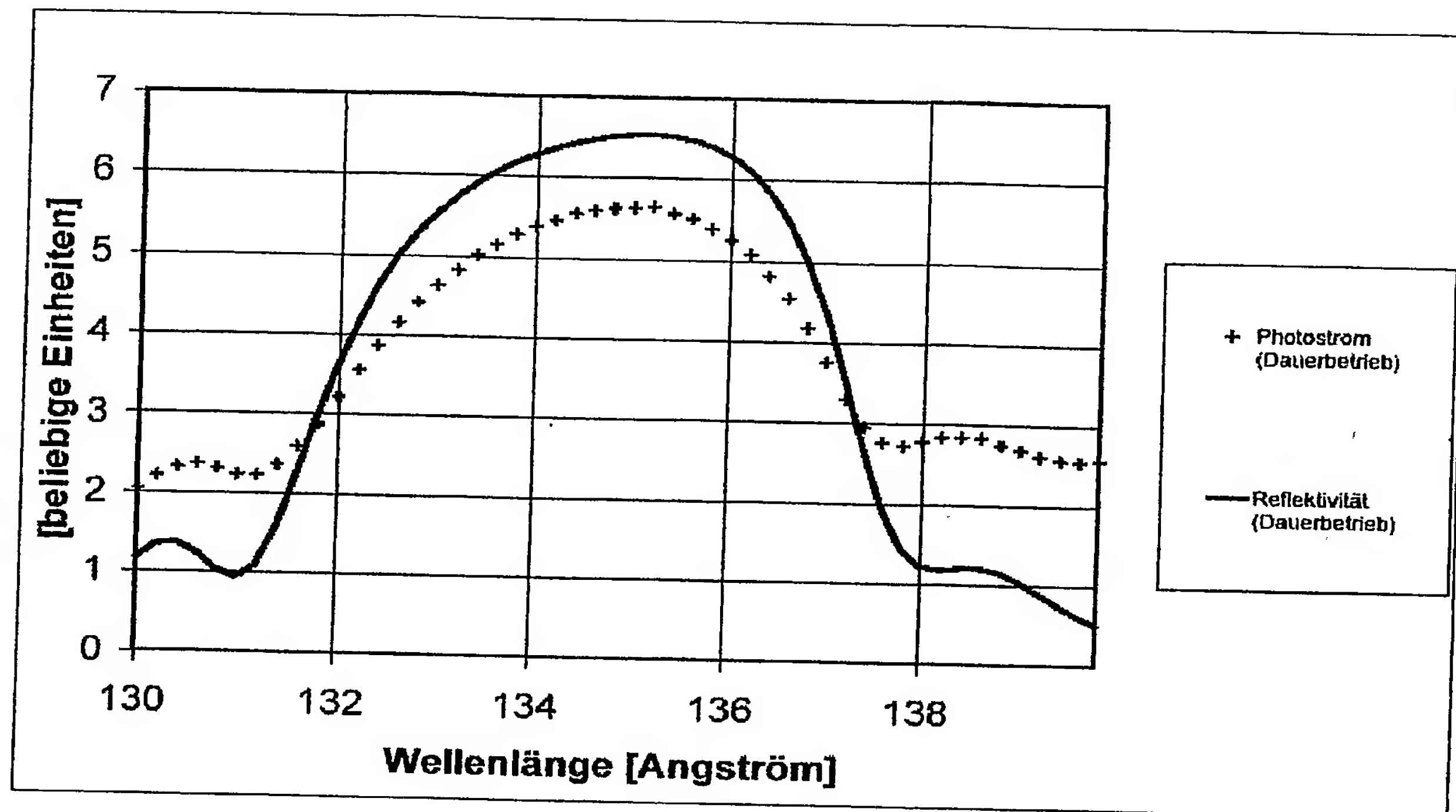
Figur 5



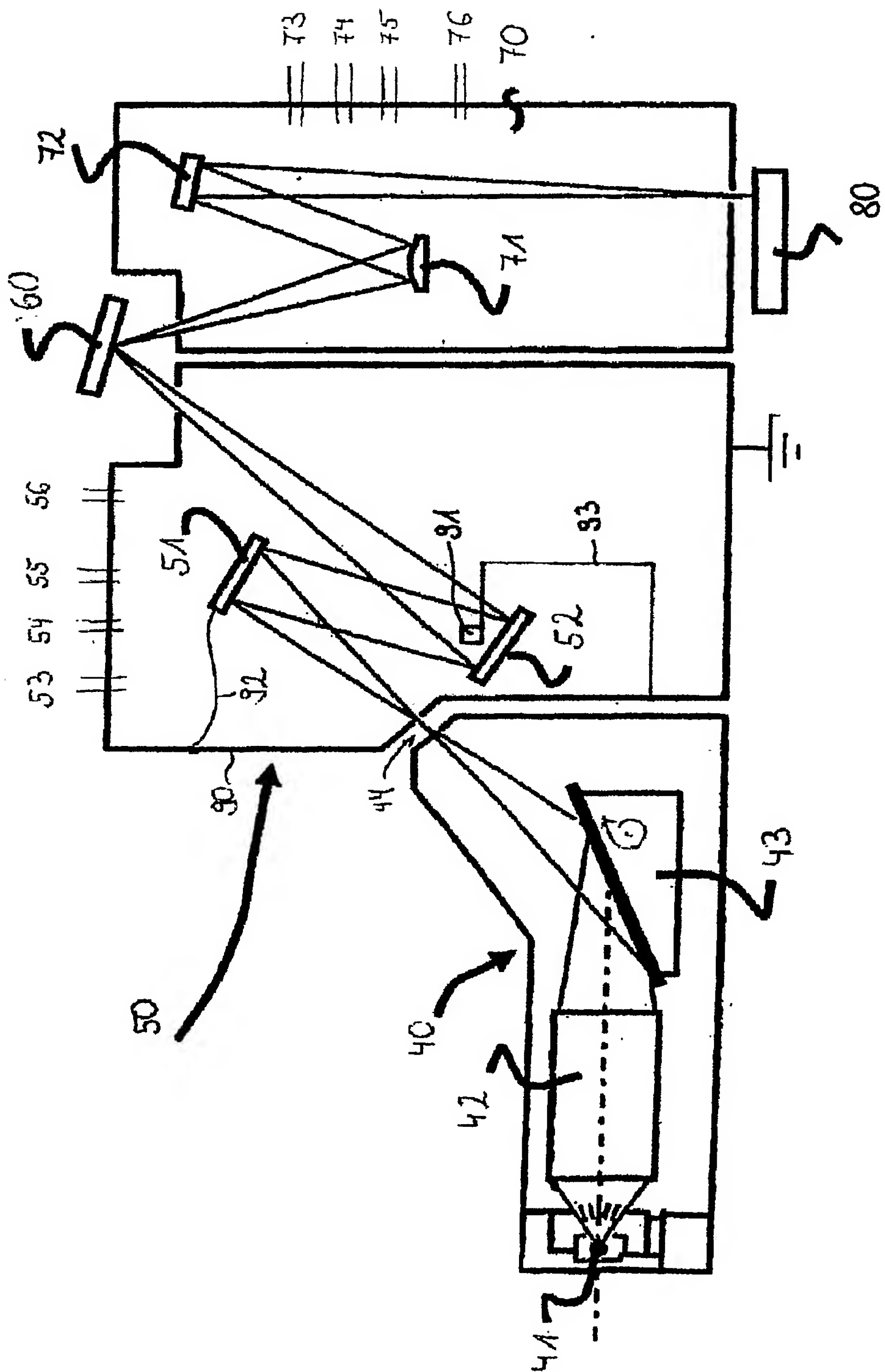
Figur 6a



Figur 6b



Figur 7



Figur 8

